www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 25, 1963, no. 9 blz. 277-316 Verschenen 7 februari 1964

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

HET „PLUMBICON", EEN NIEUWE TELEVISIE-OPNEEMBUIS

door E. F. de HAAN *), A. van der DRIFT *) en P. P. M. SCHAMPERS *).

621.397.331.222

*In het onderstaande artikel vindt men een beschrijving van een nieuwe opneembuis voor televisie, het „Plumbicon" **). Het gebruik van fotogeleidend materiaal als lichtdetector en de bouw maken dat men het „Plumbicon" in vele opzichten kan beschouwen als een soort vidicon, waarmee het dan ook de eenvoudige constructie en de gemakkelijke bedienbaarheid gemeen heeft. De minder gunstige eigenschappen van het gewone vidicon ontbreken daarentegen: ook bij laag lichtniveau zijn de beeldkwaliteit en de responsiesnelheid uitstekend. Met deze nieuwe buis, die de bestaande opneembuizen op alle voor de omroeptelevisie belangrijke punten evenaart of overtreft, worden in het bijzonder zeer goede resultaten verkregen bij gebruik in camera's voor kleurentelevisie.*

Bouw en werking van het „Plumbicon"

Gezien de eisen die men bij de omroeptelevisie stellen moet, was men daar tot nu toe genoodzaakt om bij directe uitzendingen als opneembuis een beeldiconoscoop of een beeldorthicon te gebruiken. Alleen deze buizen hadden een voldoend groot scheidend vermogen en een voldoend kleine traagheid om de overbrenging van scènes met snel wisselende en gedetailleerde objecten mogelijk te maken. De vidicons, die deze opneembuizen in eenvoud en gemakkelijke bedienbaarheid verre overtreffen, konden niet in aanmerking komen omdat ze bij lage lichtniveaus te ongelijkmatige beelden leveren — een gevolg van plaatselijke verschillen in donkerstroom — en te traag zijn [1]). Het gebruik ervan beperkte zich tot gevallen waarbij een sterke verlichting mogelijk is, zoals het aftasten van films.

De nieuwe opneembuis die we in dit artikel bespreken willen, het „Plumbicon" (*fig. 1*), verenigt de goede eigenschappen van de beide genoemde groepen van opneembuizen in zich en overtreft ze zelfs op enkele punten: het „Plumbicon" paart geringe afmetingen en eenvoudige bedienbaarheid aan het bezit van een uiterst kleine donkerstroom, een flinke gevoeligheid, een gunstige spectrale gevoeligheidsverdeling, een uitstekend scheidend vermogen en een responsiesnelheid die ook bij laag lichtniveau voldoet aan de studio-eisen. De levensduur doet niet onder voor die van andere buizen van studiokwaliteit. Opvallend is de verbetering vooral bij gebruik van de buis in ketens voor röntgentelevisie en in nog sterkere mate bij gebruik in camera's voor kleurentelevisie.

De bouw en de werking van het „Plumbicon" zijn in hoofdlijnen gelijk aan die van een vidicon (*fig. 2*). Een bundel langzame elektronen tast een dunne laag van een fotogeleidend materiaal af, met name loodmonoxyde (PbO), waarop de scène is afgebeeld. Tussen de fotogeleidende laag en de glasplaat die deze draagt, bevindt zich een dun geleidend en doorzichtig laagje SnO_2, de signaalplaat. Ten opzichte van de katode van het elektronenkanon heeft deze een potentiaal van ca. +30 V. De potentiaal van het vrije oppervlak van de fotogeleidende laag (de naar het kanon gekeerde zijde) is in het donker ongeveer gelijk aan die van de katode en wordt op de verlichte plaatsen periodiek ten hoogste ca. 10 V hoger.

Moge dus het „Plumbicon" in vele opzichten te beschouwen zijn als een soort vidicon, toch is er tussen het „Plumbicon" en de tot nu toe bekende vidicons een karakteristiek verschil, en wel door de aard van de fotogeleidende laag. Niet alleen is deze gemaakt van een ander basismateriaal — in de gewone vidicons is tot nu toe Sb_2S_3 gebruikt en soms

*) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

) Een voorlopige mededeling over deze buis verscheen in de vorige jaargang: E. F. de Haan, Philips techn. T. **24, 64, 1962.

[1]) Een beschrijving van de tot nu toe het meest gebruikte opneembuizen vindt men o.a. in D. G. Fink, Television Engineering, McGraw-Hill, New York 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

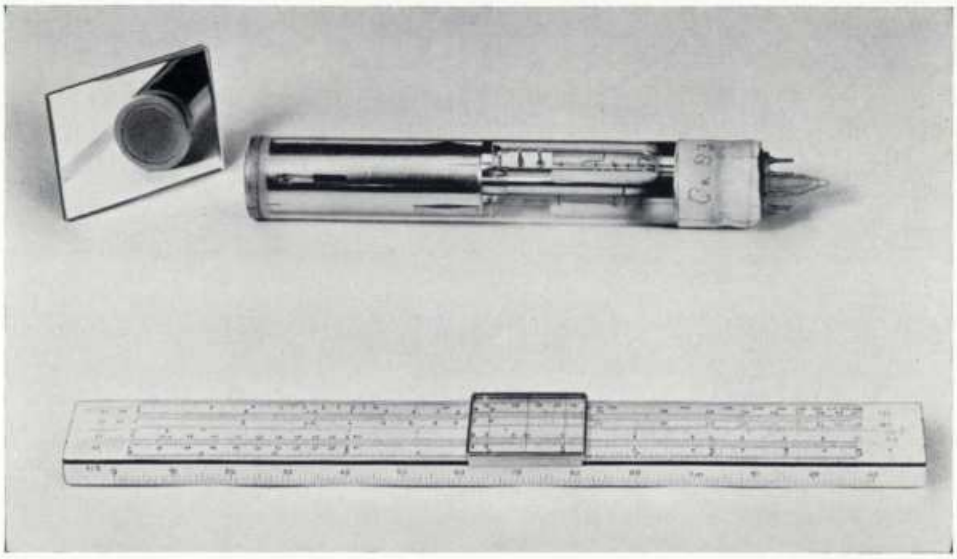
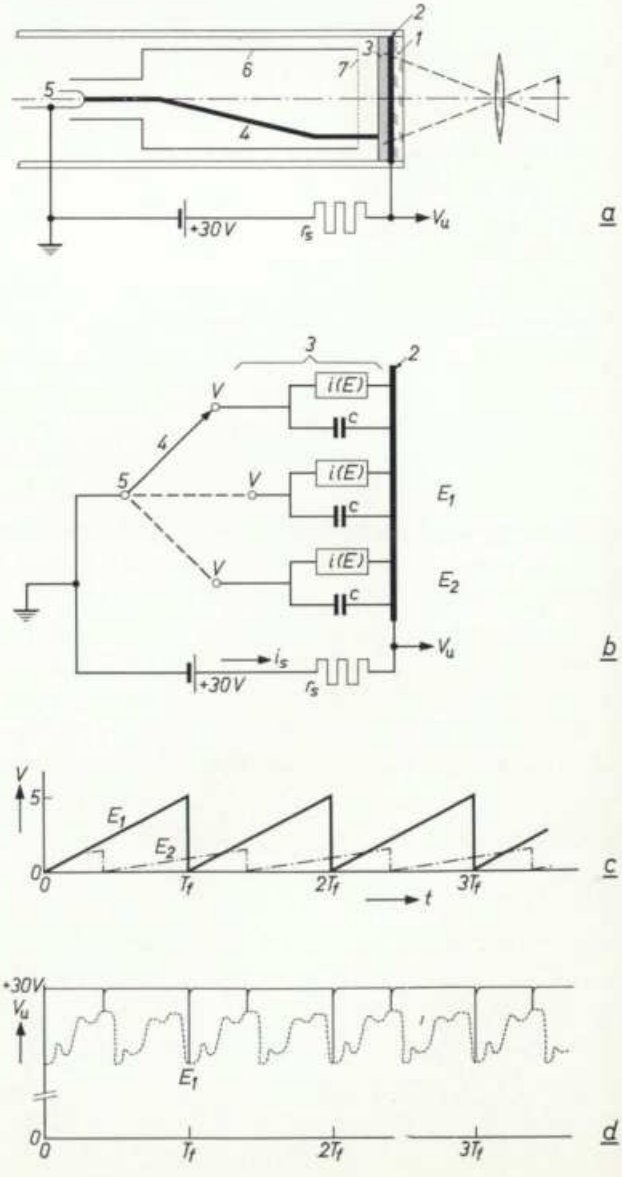


Fig. 1. Een opneembuis van het type „Plumbicon". Uitwendig heeft de buis de vorm van een cilinder met een diameter van 3 cm en een lengte van 19 cm. De diameter van de gevoelige laag is 2 cm.

Fig. 2. *a*) Schematische voorstelling van de bouw van het „Plumbicon". Op de binnenkant van het glazen venster *1* zijn achtereenvolgens een geleidende doorzichtige SnO_2-laag *2* en de fotogeleidende PbO-laag *3* aangebracht. De scène wordt afgebeeld op de PbO-laag. Aan de andere zijde wordt deze afgetast door de elektronenbundel *4*. De elektronen worden geleverd door het kanon *5* en versneld door de anode *6*. Terwille van de homogeniteit van het veld tussen de PbO-laag en de anode is deze aan de voorzijde voorzien van een gaasje *7*. Ten opzichte van de katode van het kanon is de potentiaal van de anode ca. +300 V en die van de laag *2*, de zg. signaalplaat, ca. +30 V. Als de buis werkt, beweegt de potentiaal V van het vrije oppervlak van de PbO-laag zich, zoals nader uiteengezet zal worden, binnen een interval ΔV van slechts enkele volts waarvan de ondergrens ongeveer gelijk is aan de potentiaal van de katode van het kanon.
b) Elektrisch vervangschema van het „Plumbicon" ter verklaring van de werking ervan. De cijfers hebben dezelfde betekenis als in (*a*). Rechts de signaalplaat. De fotogeleidende laag kan beschouwd worden als te zijn samengesteld uit een groot aantal condensatoren c, ieder met daaraan parallel een stroombron die een stroom i_f doet vloeien waarvan de sterkte uitsluitend afhangt van de verlichtingssterkte E, de zg. beeldelementen. De elektronenbundel kan beschouwd worden als een schakelaar die de beeldelementen beurtelings in contact brengt met de negatieve klem van de batterij die de spanning voor de signaalplaat levert. De potentiaal V van het vrije oppervlak van het beeldelement springt dan naar de waarde 0 (de katode is geaard). Gedurende de rest van de beeldtijd T_f, dat is de tijd na welke de elektronenbundel bij hetzelfde beeldelement terugkeert (gewoonlijk 1/25 seconde), lekt c door het vloeien van i_f gedeeltelijk leeg en stijgt V dus. De stijging ΔV van V tussen twee passages van de aftastende bundel is des te groter naarmate het beeldelement sterker verlicht wordt en i_f dus groter is. De met ΔV evenredige laadstroom i_s die bij iedere passage van de bundel in de keten vloeit, geeft over de signaalweerstand r_s een spanning zodat de potentiaal V_u varieert en er een uitgangssignaal verkregen wordt. Als E snel varieert, correspondeert ΔV ongeveer met het gemiddelde van de in de desbetreffende beeldperiode doorlopen waarden.
c) Het verloop met de tijd t van de potentiaal V van het vrije oppervlak van twee beeldelementen die resp. verlicht worden met een grote verlichtingssterkte E_1 en een kleine verlichtingssterkte E_2. Daar i_f onder normale omstandigheden (zie hieronder) niet afhangt van het potentiaalverschil $V_u - V$, verloopt V tussen twee passages van de elektronenbundel lineair met de tijd.
d) Het met *c*) corresponderende verloop van V_u. Beschouwt men niet slechts de bijdragen van twee beeldelementen maar die van alle, dan verloopt V_u b.v. volgens de streeplijn (periode T_f).



Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

As_2S_3 of Se — maar belangrijker is nog dat de laag, samen met de SnO_2-laag, een geheel vormt waarin drie zones (deellagen) zijn te onderscheiden, ieder van een verschillend geleidingstype. De middelste laag is van nagenoeg zuiver PbO, dat intrinsiek halfgeleidend is. In de laag aan de zijde waarop de elektronen vallen, is het PbO door geschikt doteren omgezet in een halfgeleider van het type *P* (bij Sb_2S_3 is dat tot nu toe niet mogelijk). De signaalplaat is sterk *N*-geleidend. Doordat het PbO aan de zijde van de signaalplaat in contact komt met het SnO_2, kan daar een eveneens *N*-geleidend PbO-laagje ontstaan. De *P*-geleidende en de *N*-geleidende laag zijn relatief dun, de middelste neemt vrijwel de gehele dikte van de PbO-laag in beslag. In het volgende zullen we eenvoudigheidshalve veronderstellen dat de *N*-geleidende deellaag van PbO steeds aanwezig is [2]).

Blijkens elektronenmicroscopisch onderzoek is de laag poreus; hij blijkt te zijn opgebouwd uit kristalnaaldjes waarvan de afmetingen ongeveer $0{,}1 \times 0{,}1 \times 1$ μm bedragen. De vulfactor is 30 tot 50%. De afmetingen van de kristalnaaldjes zijn klein ten opzichte van de afstand van de lijnen volgens welke de laag wordt afgetast (20 μm) en brengen het scheidend vermogen dus geenszins in gevaar. De totale dikte van de laag is 10 tot 20 μm.

Het feit dat de buis op alle voor de omroeptelevisie belangrijke punten aan hoge eisen kan voldoen, is te danken aan de zojuist geschetste meerdelige bouw van de fotogeleidende laag. Ten aanzien van twee van de belangrijkste punten, geringe donkerstroom en grote gevoeligheid, is dat gemakkelijk in te zien. Het klein zijn van de donkerstroom is daaraan te danken dat de laag, als de buis werkt, in feite een in de keerrichting geschakelde diode is — dit in tegenstelling tot de gewone vidicons. De donkerstroom is de, uiteraard kleine, keerstroom van deze diode. De grote gevoeligheid is een gevolg van de aanwezigheid van de tussen de *P*- en de *N*-laag gelegen *I*-laag. Door licht gegenereerde geleidingselektronen en gaten kunnen alleen een flinke bijdrage tot een fotostroom leveren als ze ontstaan in een gebied waar een niet te kleine veldsterkte heerst. Was de zojuist genoemde diode eenvoudig een *P*-*N*-overgang, dan zou er alleen een grote veldsterkte zijn in de naaste omgeving van de overgang en een grote fractie van de in het PbO vrijgemaakte ladingdragers zou ineffectief zijn. In het „Plumbicon" echter heerst de vereiste veldsterkte in de gehele *I*-laag, omdat deze relatief slecht geleidt. Daar deze laag bovendien vrijwel de gehele dikte van de PbO-laag in beslag neemt, leveren hier dus vrijwel alle in het PbO vrijgemaakte ladingdragers een bijdrage tot de fotostroom [3]).

Hoewel men in principe een te sterke donkerstroom natuurlijk elektrisch kan compenseren, komt dit voor de praktijk nauwelijks in aanmerking. De donkerstroom moet dan op alle delen van het scherm binnen nauwe grenzen dezelfde waarde hebben, anders krijgt men een ongelijkmatig beeld. Dit is ongewenst en voor kleurentelevisie ontoelaatbaar. Een extra moeilijkheid is dat de donkerstroom sterk van de temperatuur afhangt. Heeft men daarentegen een zeer zwakke donkerstroom, b.v. 10^{-9} A (d.i. ca. 1% van de signaalstroom), dan zullen zelfs grote plaatselijke variaties, b.v. van een factor 2, de gelijkmatigheid van het beeld niet ernstig beïnvloeden.

Op de meeste andere belangrijke punten, de spectrale gevoeligheidsverdeling, het scheidend vermogen, de responsiesnelheid en de levensduur, zijn de gunstige eigenschappen in hoofdzaak verkregen door een geschikte keuze van grootheden die de eigenschappen van de deellagen bepalen, zoals de dikte, de aard en de mate van dotering enz. Hoewel enkele van de voor studiogebruik vereiste eigenschappen tot tegenstrijdige eisen leiden, dragen de gekozen oplossingen nauwelijks het karakter van een compromis. Integendeel, er is een zo grote speelruimte dat het mogelijk is bepaalde eigenschappen vrij sterk te variëren zonder dat de overige daarbij in de verdrukking komen. Het is daardoor mogelijk goede opneembuizen van het type „Plumbicon" te vervaardigen waarvan de eigenschappen in hoge mate zijn afgestemd op de eisen die een bepaalde toepassing stelt. Hierbij is nog buiten beschouwing gelaten de zeer ruime mogelijkheid tot variatie die verkregen wordt wanneer men zich niet tot PbO als basismateriaal beperkt maar daar b.v. PbS aan toevoegt [4]).

Verderop in dit artikel zal het bovenstaande nader worden uitgewerkt [5]). Eerst volgen nog een bespreking van de relevante fysische en chemische eigenschappen van PbO, enkele opmerkingen over de wijze waarop de PbO-laag gemaakt wordt, en een korte beschrijving van de wijze waarop de potentiaal van het vrije oppervlak van de laag gedurende een beeldperiode varieert.

De eigenschappen van PbO; het aanbrengen van de fotogeleidende laag

Van PbO zijn twee modificaties bekend, de rode (tetragonaal), die stabiel is bij temperaturen beneden

[2]) Een uitvoeriger vergelijking van de eigenschappen van het „Plumbicon" met die van andere buizen vindt men in een artikel van A. G. van Doorn en S. L. Tan dat binnenkort in dit tijdschrift zal verschijnen.

[3]) Een beknopte uiteenzetting van de fysische grondslagen van de fotogeleiding vindt men o.a. in L. Heijne, Philips techn. T. **25**, 262-273, 1963 (no. 8).

[4]) Zie een artikel van E. F. de Haan, F. M. Klaassen en P. P. M. Schampers dat binnenkort in dit tijdschrift zal verschijnen.

[5]) Zie ook L. Heijne, dissertatie Amsterdam 1960, hfdst. 8.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

488 °C, en de gele (orthorhombisch), die stabiel is bij hogere temperaturen. Het kristalrooster van de rode modificatie kan men zich opgebouwd denken uit „sandwiches", ieder bestaande uit een met O-atomen bezet vlak, met aan weerszijden daarvan een vlak dat half zo dicht bezet is met Pb-atomen. Zo'n sandwich heeft een dikte van 2,38 Å, de onderlinge afstand van de O-vlakken is 4,99 Å.

De structuur van de gele modificatie verschilt aanzienlijk van die van de rode. Weliswaar is ook hier een sandwich aanwezig met aan de buitenkant Pb-atomen, maar binnen de sandwich is de structuur gecompliceerder. De dikte ervan is dan ook wat groter (2,72 Å). Verschillende onderzoekers hebben aangetoond dat, speciaal in rood PbO, zuurstof ingevoegd kan worden tussen de sandwiches zonder dat de kristalstructuur ingrijpend verandert; men kan dus van de stoechiometrische verhouding afwijken. Aan deze belangrijke eigenschap is het mede te danken dat men van PbO zowel een geleider van het type N als van het type P kan maken: het PbO is gebleken een halfgeleider van het type P te worden als er een overmaat van zuurstof is of als het gedoteerd is met Tl, Cu of Ag. Het wordt een halfgeleider van het type N als er een overmaat lood is of als het gedoteerd is met Bi.

De breedte ΔE van de verboden zone tussen de valentieband en geleidingsband, die bepalend is voor de bovengrens van het golflengtegebied waarbinnen foto-excitatie kan optreden, is voor rood PbO 2,0 eV en voor geel PbO 2,7 eV. De bandafstand van rood PbO correspondeert met een grensgolflengte van ca. 6200 Å, die van geel met ca. 4500 Å.

Het maken van de PbO-laag van een „Plumbicon" geschiedt door opdampen. Het PbO wordt verdampt vanuit een platinabakje dat inductief verhit wordt, en slaat neer op het van te voren met SnO_2 bedekte venster. De temperatuur van het bakje wordt op ongeveer 900 °C gehouden; bij deze temperatuur heeft de opdampsnelheid een redelijke waarde. De temperatuur die het venster tijdens het opdampen heeft, wordt eveneens ingesteld en vrij nauwkeurig constant gehouden. Vooral een te hoge vensertemperatuur is nadelig, omdat de kristallen dan groter kunnen worden dan in verband met het scheidend vermogen toelaatbaar is. Het opdampen geschiedt niet in vacuüm maar in een bepaalde gasatmosfeer.

Door het grote verschil in grensgolflengte van rood en geel PbO is de verhouding rood-geel uiteraard van grote invloed op de spectrale gevoeligheidsverdeling. Uit een röntgendiffractieonderzoek, waarbij het diffractiepatroon van volgens het zg. standaardprocédé opgedampte PbO-lagen werd vergeleken met dat van bepaalde poedermengsels van geel en rood PbO, is gebleken dat deze lagen voor ca. 90% uit rood en voor ca. 10% uit geel PbO bestonden. Bij lagere opdampdrukken dan de normale, was de fractie geel PbO groter. Verder bleek er voor de rode kristallen een voorkeursrichting te bestaan.

De oppervlakpotentiaal; stabilisatie

Zoals eerder werd vermeld, beweegt de potentiaal V van het vrije oppervlak van de PbO-laag zich in een gebied dat dicht nabij de potentiaal van de katode gelegen is: als de elektronenbundel een bepaald element van dit oppervlak verlaat, is de potentiaal daarvan nagenoeg gelijk aan die van de katode; in de tijd die verloopt voordat de bundel terugkeert, stijgt V slechts enkele volts. De preciese ligging van het gebied wordt bepaald door de eis dat in een stationaire toestand de (negatieve) lading die door de fotostroom per tijdseenheid wordt afgevoerd, gelijk moet zijn aan de lading die de elektronenbundel aanvoert. (Daar deze aanvoer stootsgewijs geschiedt, geldt deze gelijkheid uiteraard alleen als men een tijdinterval van een geheel aantal beeldperiodes beschouwt.)

In sommige gevallen echter kan aan de eis van gelijke ladingsaanvoer en -afvoer ook voldaan worden als V zich beweegt in een gebied dat dicht bij de potentiaal van de signaalplaat ligt. Daar deze situatie, die tot diverse storende effecten leidt, in een „Plumbicon" wat gemakkelijker kan optreden dan in een gewoon vidicon [2]), willen we een en ander wat nader beschouwen. Daarbij zal vanzelf blijken hoe men ervoor kan zorgen dat V zich op de gewenste wijze instelt.

In *fig. 3* vindt men schematisch weergegeven hoe de nettostroom i_a naar een element van het opper-

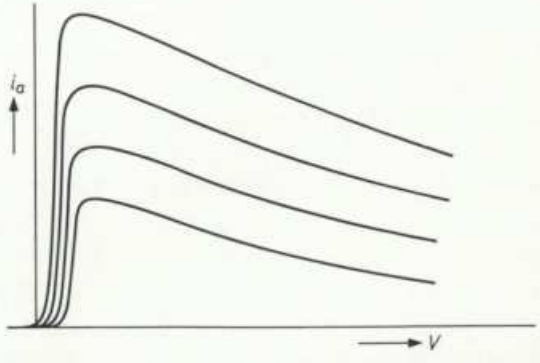


Fig. 3. De nettostroom i_a naar een element van het oppervlak van een met elektronen beschoten PbO-laag als functie van de potentiaal V van dat oppervlak (de potentiaal van de katode van het elektronenkanon is nul gesteld). Met toenemende V neemt i_a aanvankelijk toe, maar vervolgens, door de sterker wordende secundaire emissie, weer af. De krommen (schematisch weergegeven) gelden voor verschillende waarden van de elektronenstroom die het kanon verlaat, de zg. bundelstroom.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vlak van een met elektronen beschoten PbO-laag afhangt van de potentiaal V van dit element. De diverse krommen gelden voor verschillende waarden van de zg. bundelstroom, d.i. de stroom der van het kanon vertrekkende elektronen. Wanneer deze potentiaal gelijk is aan die van de katode ($V = 0$), worden de elektronen op het laatste deel van hun baan even sterk afgeremd als ze voordien versneld waren en zullen er slechts weinig de laag bereiken. Verder is, door de secundaire emissie, de nettostroom naar de laag kleiner dan overeenkomt met het aantal elektronen dat erop valt; dit effect wordt met toenemende V op den duur zo sterk dat de nettostroom naar de laag zelfs afneemt. De wijze waarop de fotostroom die door de PbO-laag vloeit en die negatieve lading van het vrije oppervlak afvoert, afhangt van het potentiaalverschil U van de beide oppervlakken van de laag ($U = V_u - V$; zie fig. 2), is globaal weergegeven in *fig. 4*. De uitgezette grootheid i_b is weer de waarde van de stroom per oppervlakelement.

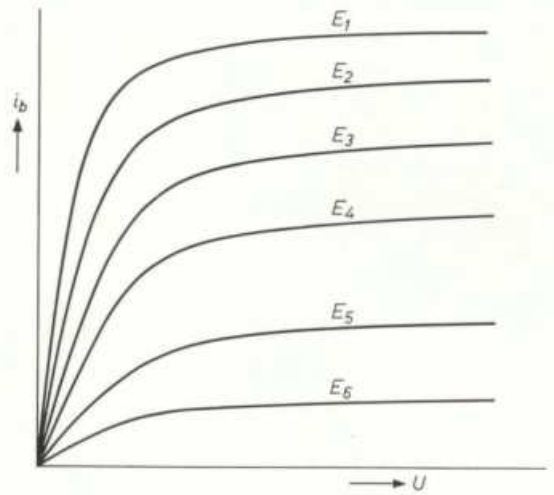


Fig. 4. Het verloop met de spanning U over de laag van de fotostroom i_b die de lading van een element van het vrije oppervlak van de PbO-laag afvoert. De krommen (schematisch weergegeven) gelden voor verschillende verlichtingssterkten E_i. De stroom i_b is des te sterker naarmate E_i groter is.

In *fig. 5* is één der krommen van fig. 3 gecombineerd met de schaar van krommen van fig. 4. Dit correspondeert met de situatie in een buis: de verlichtingssterkte kan velerlei waarden aannemen, maar de bundelstroom is, behoudens ingrijpen van buitenaf, steeds dezelfde. Om redenen die aanstonds duidelijk zullen worden, zijn de ordinaatwaarden van de krommen voor de afvoerstroom $N\times$ vergroot (N is het aantal elementen waarin we ons het oppervlak van de laag verdeeld kunnen denken). Uitgezet zijn dus i_a en Ni_b.

Beschouw nu een denkbeeldige buis waarin de bundel stilstaat en waarin de gehele laag samengetrokken is gedacht in het ene elementje waarop de bundel gericht is. Er vloeit dan bij constante verlichting een constante afvoerstroom Ni_b. De potentiaal V zou zich in deze buis instellen op een waarde die overeenkomt met de absciswaarde van een der snijpunten van de i_a- en de desbetreffende Ni_b-curve in fig. 5: de afvoer en de aanvoer van lading zijn dan immers gelijk. De snijpunten die stabiele toestanden representeren, zijn in fig. 5 aangegeven met een stip. Zoals men ziet, kunnen deze zowel op de stijgende als op de dalende tak van de i_a-kromme voorkomen. Voor de eerste ligt V dicht bij de waarde 0 en is de spanning U die over de laag staat, dus nagenoeg gelijk aan V_u. De snijpunten op de dalende tak representeren toestanden waarvoor U zeer klein is.

We stappen nu over naar de werkelijke situatie, waarbij de bundel een laag aftast en de toevoerstroom naar een oppervlakelement slechts $1/N$-de deel van de tijd vloeit. Door de stootsgewijze ladingstoevoer stelt V zich niet in op een vaste waarde, maar men kan bewijzen dat het gebied waarin V zich beweegt, zich uitstrekt aan beide zijden van een der zojuist genoemde absciswaarden. Daar de breedte ΔV van dit gebied normaliter klein is ten opzichte van V_u, geven deze absciswaarden dus toch een redelijk goede indicatie van de wijze waarop de buis zich kan instellen: ook in de werkende buis zijn er twee instellingen mogelijk. Die waarbij $V \approx V_u$ is, en U dus klein, is echter uitermate ongunstig: niet alleen hangt de evenwichtswaarde van i_a hier slechts zwak af van de verlichtingssterkte, waardoor de contrasten vrijwel verloren gaan, maar ook kunnen bij kleine U bijzondere vormen van traagheid optreden.

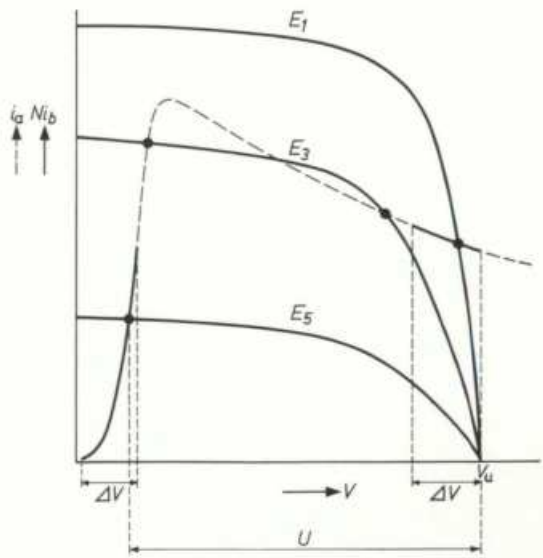


Fig. 5. Ter verklaring van het feit dat het interval ΔV waarin de potentiaal V zich beweegt, zowel dicht bij $V = 0$ als dicht bij $V = V_u$ kan liggen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om deze redenen kiest men in de praktijk de bundelstroom dan ook zo groot dat er ook voor de grootste verlichtingssterkte die bij een bepaalde uitzending plaatselijk op de PbO-laag kan voorkomen, een snijpunt op de stijgende tak ligt. Men vermijdt daarmee automatisch een derde, niet minder belangrijk, stooreffect dat optreedt als de potentiaal van zeker beeldelement dicht bij V_u ligt en dat van een naburig dicht bij nul. Het beeldelement met $V \approx V_u$ trekt de elektronen van de bundel dan reeds naar zich toe vóórdat de bundel dit element behoort te bereiken, en blijft dat nog enige tijd doen nadat de bundel gepasseerd had moeten zijn. De lichte partijen van de scène worden dan in het televisiebeeld groter dan ze in werkelijkheid zijn (het zg. opblazen).

Het feit dat het interval ΔV waarbinnen V zich beweegt, de absciswaarden van het snijpunt van de krommen voor i_a en Ni_b moet bevatten, bewijst men als volgt. Gedurende de korte tijd T_p waarin de bundel een zeker oppervlakelement passeert, geldt voor de toevoer van (negatieve) lading:

$$dQ = (i_a - i_b)dt \approx i_a dt = c dV.$$

Hierin is dQ de in de tijd dt toegevoerde lading en c de capaciteit van de laag per oppervlakelement. Hieruit volgt: $dV/i_a = dt/c$. In de tijd T_p daalt V van V_2 tot V_1 en dus geldt:

$$\int_{V_2}^{V_1} \frac{dV}{i_a} = \frac{T_p}{c}.$$

Voor de potentiaalstijging ten gevolge van het vloeien van de afvoer(foto)stroom geldt geheel analoog:

$$-\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{i_b} = \frac{T_f}{c},$$

of, daar $T_f = NT_p$:

$$\int_{V_2}^{V_1} \frac{dV}{Ni_b} = \frac{T_p}{c}.$$

Zet men dus $1/i_a$ en $1/Ni_b$ beide uit als functie van V, dan zijn de oppervlakten onder de curven tussen de ordinaten $V = V_1$ en $V = V_2$ even groot. Dit impliceert dat de krommen in het interval V_1-V_2 ten minste één snijpunt moeten hebben. Hetzelfde geldt derhalve voor de krommen voor i_a en Ni_b.

De fotogeleidende laag als *P-I-N*-diode

Ter verkrijging van een zo klein mogelijke donkerstroom en van de grootste gevoeligheid die in combinatie daarmee mogelijk is, zou men theoretisch moeten werken met een laag van een intrinsieke fotogeleider waarop zodanige contacten zijn aangebracht dat, bij een bepaalde stroomrichting, het ene de nalevering van elektronen en het andere de nalevering van gaten belet (zg. blokkerende contacten; zie *fig. 6*). In het „Plumbicon" fungeert de *P*-laag als contact dat het binnentreden van elektronen belet, en wordt het contact dat het binnentreden van gaten belet, gevormd door het SnO_2 of door het laagje PbO dat daar direct aan grenst, indien dat een geleider van type *N* is geworden [6]). Het feit dat in het „Plumbicon" de fotogeleidende laag voorzien is van blokkerende contacten, maakt een der belangrijkste verschilpunten met de gewone vidicons uit.

In *fig. 7a* en *b* is schematisch weergegeven hoe het bandenschema van een *P-I-N*-diode er in de praktijk uitziet; in fig. 7*a* gedetailleerd en in fig. 7*b* vereenvoudigd. Het verschilt van het schema van fig. 6 o.a. daarin dat de banden in de *I*-laag gekromd zijn. De oorzaak hiervan is dat deze laag in werkelijkheid nooit volmaakt vrij kan zijn van verontreinigingen. Er is steeds een zeker aantal donor- en acceptorcentra. De figuren gelden voor het geval dat de concentraties van beide ongeveer gelijk zijn en betrekkelijk groot. Bij kleine concentraties gaan de gekromde delen in elkaar over en krijgt men een schema als in fig. 7*c*. Fig. 7*d* toont hoe dit schema verandert wanneer er een potentiaalverschil wordt aangelegd. Daar de middelste laag (*I*) verreweg de grootste weerstand heeft, is in deze laag de potentiaaldaling het grootst. Ten gevolge van de bandkromming is de veldsterkte echter niet overal even groot. *Fig. 8* toont hoe het potentiaalverloop in de middelste laag

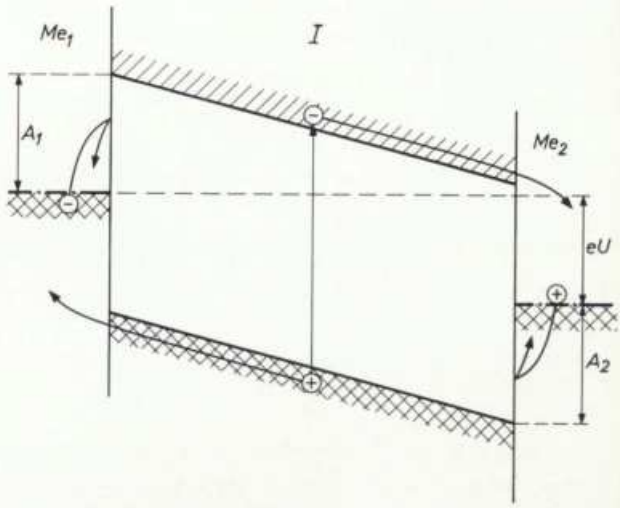


Fig. 6. Bandenschema (sterk vereenvoudigd) van een intrinsieke halfgeleider (*I*) waarop twee metaalcontacten (Me_1 en Me_2) zijn aangebracht. Me_1 heeft een zo grote uittreearbeid (A_1) dat de zich in dit contact bevindende elektronen een zeer geringe kans hebben om de geleidingsband van de halfgeleider te bereiken. Evenzo kan de valentieband niet bereikt worden door uit het metaal Me_2 komende gaten (uittreearbeid A_2). De door licht in de halfgeleider vrijgemaakte ladingdragers kunnen daarentegen, na zich onder invloed van een elektrisch veld (aangelegde spanning U) naar het desbetreffende contact bewogen te hebben, ongehinderd dit contact binnengaan. (Voor de eenvoud is $A_1 = A_2 = \frac{1}{2}\Delta E$ gekozen.)

[6]) Zie F. A. Kröger, G. Diemer en H. A. Klasens, Phys. Rev. **103**, 279, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

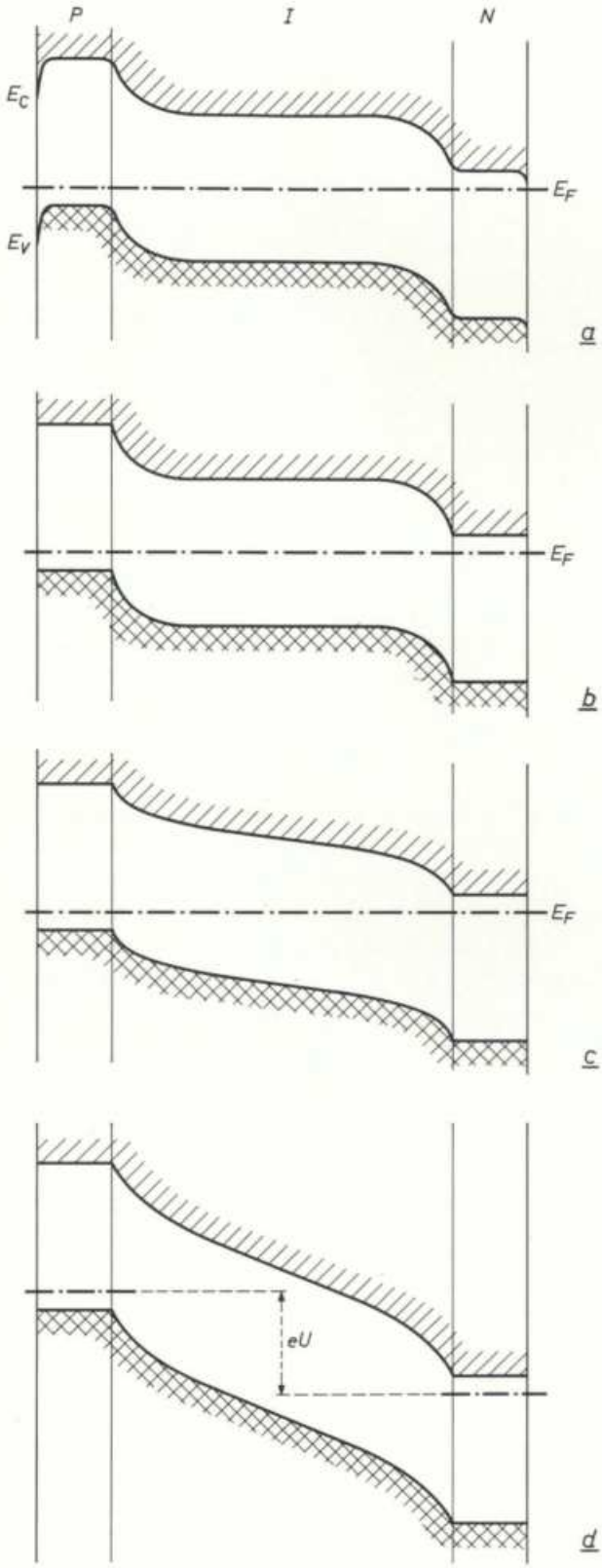


Fig. 7. *a*) Bandenschema van *P-I-N*-diode. De kromming van de banden in de *I*-laag wordt veroorzaakt door het feit dat deze laag in de praktijk niet volmaakt vrij kan zijn van verontreinigingen. De concentratie daarvan is in het getekende geval relatief hoog. *b*) als (*a*) maar vereenvoudigd: de sterke krommingen in de *P*- en de *N*-laag bij de grenzen zijn getekend als scherpe knikken. *c*) als (*b*) maar voor een *I*-laag die zo zuiver is dat de gekromde delen van de banden in elkaar overgaan (geen horizontaal stuk dus). *d*) als (*c*) maar in het geval dat er een spanning U is aangelegd.

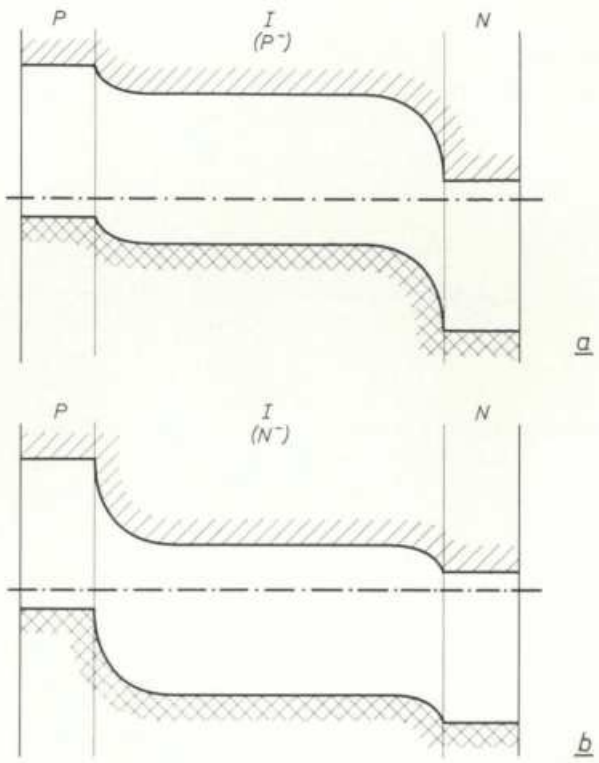


Fig. 8. Bandenschema, vereenvoudigd op de wijze van fig. 7*b*, voor *P-I-N*-diode waarin de *I*-laag enigszins *P*-geleidend is (*a*) resp. *N*-geleidend (*b*). In deze gevallen is er een vrij steil potentiaalverval dicht bij het ene contact en een gebied met een gering potentiaalverval (dus een zeer kleine veldsterkte) aan de zijde van het andere.

afwijkt van dat van fig. 7 wanneer de donor- en acceptor-concentraties ongelijk zijn en dus deze laag enigszins *P*-geleidend of *N*-geleidend is. In het eerste geval treft men de sterkste potentiaaldaling (de grootste veldsterkte) aan aan de zijde van het *N*-contact, in het andere geval aan de zijde van het *P*-contact. In hetgeen volgt, zal de praktische betekenis hiervan nog ter sprake komen.

In *fig. 9* vindt men het bandenschema van een enkel contact met daarin aangegeven de belangrijkste

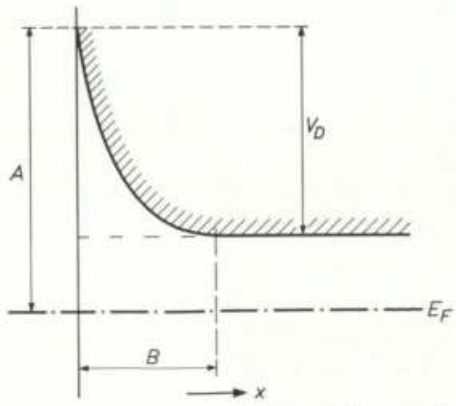


Fig. 9. De vorm van de potentiaalbarrière die optreedt bij de grens van twee gebieden waarin verschillende typen van geleiding optreden, wordt beschreven met behulp van de grootheden A, de uittreearbeid [7]); V_D, de diffusiepotentiaal; en B, de breedte.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

grootheden waarmee de vorm van de potentiaalbarrière beschreven kan worden: de uittree-arbeid (barrièrehoogte) A, de breedte B van het gebied waarin de banden gekromd zijn, en de diffusiepotentiaal V_D [7]). Voor de breedte geldt de formule:

$$B = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_D + U)}{eN_D}}, \quad \ldots \quad (1)$$

en voor de capaciteit c' per oppervlakte-eenheid:

$$c' = \frac{\varepsilon}{B} = \sqrt{\frac{\varepsilon\, eN_D}{2(V_D + U)}}. \quad \ldots \quad (2)$$

Hierin zijn ε en e resp. de diëlektrische constante en de absolute waarde van de lading van het elektron, N_D is de (kleine) donorconcentratie in het I-gebied en U de aangelegde spanning. Verder geldt voor de veldsterkte F in de barrière:

$$F = \frac{eN_D(x-B)}{\varepsilon}, \quad \ldots \quad (3)$$

waarin x de afstand tot het grensvlak is. Hieronder zal van deze formules nog gebruik gemaakt worden.

De donkerstroom

Zoals we zagen, wordt de donkerstroom in hoofdzaak bepaald door de keerstroom van de P-I- en de I-N-overgang. We zullen thans nagaan hoe groot die is en beperken ons daarbij tot één contact en tot de soort ladingdragers waarvoor dit contact blokkerend is, b.v. de P-I-overgang en de elektronen.

Voor zulk een contact, geschakeld in de keerrichting, geldt voor de dichtheid j_n van de elektronenstroom:

$$j_n(U) = n(0)\, e\mu_n\, F(0) = -n(0)\, e\mu_n \sqrt{\frac{2eN_D(V_D+U)}{\varepsilon}}. \quad \ldots \quad (4)$$

Hierin is nog μ_n de beweeglijkheid van de elektronen en $n(0)$ de elektronenconcentratie in het grensvlak. De waarde van $n(0)$ hangt met de absolute temperatuur T, de uittreearbeid A en de constante N_c (de zg. effectieve niveaudichtheid in de geleidingsband) samen volgens de formule:

$$n(0) = N_c\, e^{-A/kT}. \quad \ldots \quad (5)$$

Met behulp van (4) en (5) kan men berekenen welke waarde A ten minste moet hebben om bij gegeven U, T, N_D, ε en μ_n een donkerstroom te krijgen die kleiner is dan b.v. 10^{-8} A. (Dit is ruwweg 10% van de signaalstroom en correspondeert, daar het oppervlak ruim 3 cm² is, met $j_n \approx 3\times10^{-9}$ A/cm².) Men vindt het resultaat van een aantal van zulke berekeningen samengevat in *tabel I*. Bij deze berekeningen is $U = 50$ V gesteld, $T = 300$ °K en $\varepsilon = 12\,\varepsilon_0$. (Voor massief PbO heeft ε de waarde $26\,\varepsilon_0$.)

Tabel I. De voor enige combinaties van de beweeglijkheid μ_n (cm²/Vs) en de donorconcentratie N_D (cm⁻³) geldende minimumwaarden van de uittreearbeid A (eV) van een contact op een fotogeleidende laag, vereist om bij een aangelegde spanning van 50 V een donkerstroom te hebben van ten hoogste 10^{-8} A. (De relatieve diëlektrische constante is op 12 gesteld, de temperatuur op 300 °K, de oppervlakte van de laag op 3 cm². Verder is V_D verwaarloosd.)

μ_n \ N_D	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}
1	0,79	0,81	0,84	0,87	0,90
10	0,84	0,87	0,90	0,93	0,96
100	0,90	0,93	0,96	0,99	1,02

Zoals men ziet, ligt de op zijn minst vereiste waarde van A in een groot gebied van μ- en van N_D-waarden in de buurt van 0,9 eV. (We merken op dat $N_D = 10^{14}$ cm⁻³ correspondeert met zeer zuiver en $N_D = 10^{18}$ cm⁻³ met sterk gedoteerd materiaal.) Uit fig. 7*b* valt af te leiden dat de bandafstand $\Delta E \geqq A$ moet zijn en derhalve eveneens tenminste ca. 0,9 eV moet bedragen. Bij hogere temperatuur zal een grotere A en dus ook een grotere bandafstand nodig zijn (zie formule 2), bij lagere temperatuur kan men volstaan met een kleinere of, omgekeerd gezegd: het gebruik van materiaal met een bandafstand kleiner dan 0,9 eV is niet onmogelijk, maar dan moet men koelen om een voldoend kleine donkerstroom te verkrijgen. Het is nu in te zien waardoor met een laag van PbO waarop blokkerende contacten zijn aangebracht, ook zonder koelen een uiterst lage donkerstroom te bereiken is; de bandafstand van rood PbO is immers reeds 2,0 eV. In *fig. 10* kan men zien hoe de donkerstroom van het „Plumbicon" varieert met de spanning die over de laag staat.

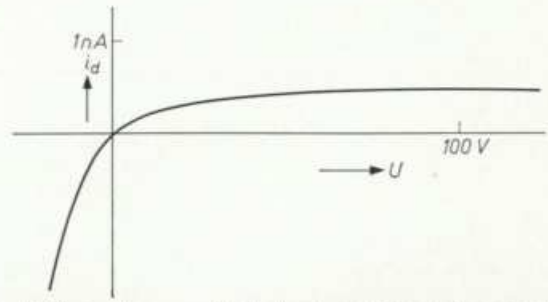


Fig. 10. Het verloop van de donkerstroom i_d met de spannnig U over de laag. De donkerstroom is voor geen enkele praktisch optredende waarde van U groter dan $0{,}5\times10^{-9}$ A. Zoals verwacht mocht worden, heeft de curve de vorm van een diodekarakteristiek. (In feite is horizontaal uitgezet de potentiaal V_a van de signaalplaat. Deze is echter nagenoeg gelijk aan U. Hetzelfde geldt voor fig. 11 en 12.)

[7]) Zie het aangehaalde artikel [3]). Daar de thermische uittreearbeid materie-vacuüm in dit artikel niet voorkomt, duiden we de grootheid A, de thermische uittreearbeid contact-halfgeleider, gemakshalve kortweg aan met de naam uittreearbeid.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

In het bovenstaande is stilzwijgend aangenomen dat de thermische generatie van ladingdragers in het *I*-gebied verwaarloosd mag worden. Berekening leert dat dit voor de praktijk toelaatbaar is. (Alleen in het meest ongunstige geval, nl. dat waarbij de stoorniveaus ongeveer op halver hoogte in de verboden zone liggen, zou men met een materiaal met een bandafstand van 0,9 eV een te sterke donkerstroom krijgen.)

De gevoeligheid

We bespreken nu de wijze waarop de fotostroom die door de PbO-laag vloeit, afhangt van het potentiaalverschil tussen de *P*- en de *N*-laag, de verlichtingssterkte en de lichtsoort, en ook de wijze waarop deze afhankelijkheden variëren met de dikte en de aard van de deellagen. In *fig. 11* vindt men weergegeven hoe de fotostroom i_f voor enige lichtsoorten, de doorslagspanning van de PbO-laag is zo hoog dat men voor *U* b.v. zonder bezwaar 50 V kan kiezen.

We zullen nu uiteenzetten waaraan deze snelle verzadiging te danken is. Zoals bekend, heeft de fotostroom de verzadigingswaarde als de tijd die de ladingdragers nodig hebben om een contact te bereiken, de oversteektijd, kleiner is dan hun levensduur. Deze oversteektijd hangt niet alleen af van de aangelegde spanning, maar tevens van het veldverloop. Wanneer de *I*-laag betrekkelijk sterk verontreinigd is, zijn bij kleine *U* de gebieden waarin de banden gekromd zijn, smal en is er in het midden van de laag een stuk waar de veldsterkte uiterst klein is (zie fig. 7 en formule 1). De oversteektijd is dan zeer groot en de meeste ladingdragers recombineren voordat ze een contact bereikt hebben. Eerst wanneer de aangelegde spanning zo hoog is opgevoerd dat de breedte van een van de genoemde gebieden

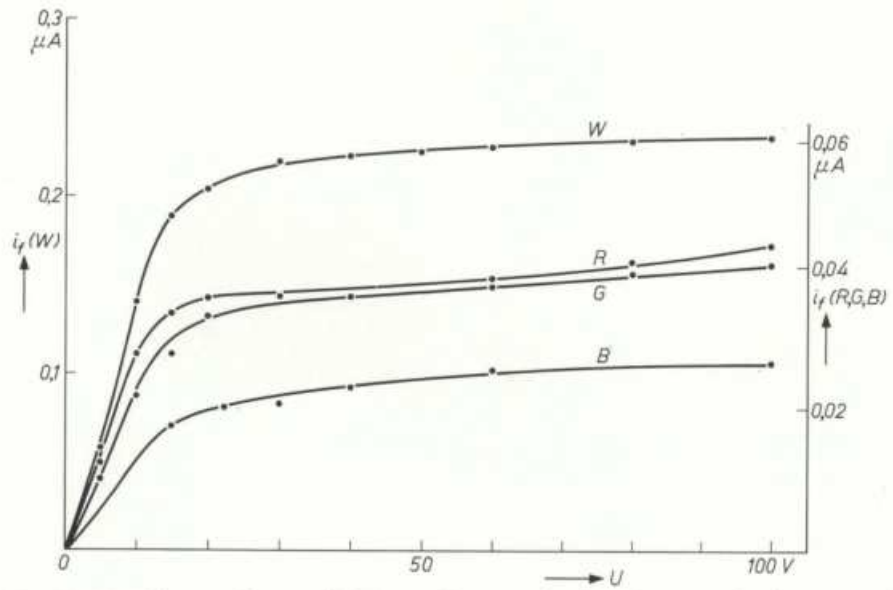


Fig. 11. Het bij een zekere verlichtingssterkte optredende verloop van de fotostroom i_f als functie van de spanning *U* over de laag, voor wit licht (kromme *W*; linker i_f-schaal; onder wit licht te verstaan: zwarte straling van 2640 °K) en voor rood, groen en blauw licht (resp. de krommen *R*, *G* en *B*; rechter i_f-schaal), zoals gemeten aan een willekeurige buis. De krommen *R*, *G* en *B* zijn verkregen door, zonder verder iets te veranderen, in de lichtweg een filter te plaatsen waarvan de doorlating ongeveer overeenkomt met het gelijknamige filter van een camera voor kleurentelevisie. (De gebruikte filters zijn resp. Gevaert R 586, G 537 en B 488.) Voor alle lichtsoorten wordt de verzadigingswaarde van i_f reeds bereikt bij een spanning van enkele tientallen volts. Voor zeer kleine waarden van *U* zijn de krommen ietwat hol.

rood, groen, blauw en wit, varieert met de aangelegde spanning *U*. Het blijkt dat i_f aanvankelijk met *U* toeneemt, en vervolgens constant wordt. Deze verzadiging, in combinatie met het feit dat het quantumrendement dicht bij één blijkt te liggen, wijst erop dat de contacten inderdaad, zoals we wensen, geen ladingdragers naleveren.

Verder ziet men dat de verzadigingswaarde van i_f voor alle lichtsoorten reeds bereikt wordt bij een waarde van *U* die praktisch zeer wel realiseerbaar is; ongeveer gelijk wordt aan de dikte van de laag, kan de veldsterkte overal zo groot zijn dat alle door het licht vrijgemaakte ladingdragers hun maximale bijdrage tot de stroom leveren. In het „Plumbicon" nu is de donor- en acceptorconcentratie in de *I*-laag zó klein dat reeds bij een zeer kleine aangelegde spanning de kromming van de banden zich over de gehele dikte van de laag uitstrekt.

Bovendien is deze onvermijdelijke verontreiniging er een die de eigenschappen van de buis het minst

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

schaadt: de *I*-laag is in geringe mate een halfgeleider van type *P*. Het gebied waar de veldsterkte het kleinst en de recombinatie dus het sterkst is — we noemen dat voortaan een „veldvrij" gebied —, bevindt zich dientengevolge het dichtst bij de *P*-laag (vgl. fig. 7*a*). Op deze plaats is de nadelige invloed ervan veel geringer dan wanneer zo'n gebied zich dicht bij de *N*-laag zou bevinden (vgl. fig. 7*b*). Dit hangt samen met de absorptie van het licht in de PbO-laag. Het rode licht wordt vrij gelijkmatig in de laag geabsorbeerd, het blauwe daarentegen voor het grootste deel binnen de eerste 5 μm die het in het PbO aflegt. Is er nu een breed, veldvrij gebied direct achter de *N*-laag, dan leveren de door het blauwe licht gegenereerde ladingdragers geen enkele bijdrage tot de fotostroom. Bij toenemende spanning wordt het „veldvrije" gebied wel smaller, maar de delen daarvan die vlak achter de signaalplaat liggen en waar de grootste hoeveelheid blauw licht geabsorbeerd wordt, blijven het langst intact. De karakteristiek krijgt dan voor blauw licht een „voet" (*fig. 12*) en verzadiging treedt eerst op bij een veel hogere waarde van de aangelegde spanning dan in het geval dat de laag *P*-geleidend is en de veldvrije zone zich aan de kanonzijde bevindt.

Uit een oogpunt van levensduur is het, naar nog zal blijken, zelfs gunstig als de *I*-laag ietwat *P*-geleidend is.

Ingeval de kromming van de banden gering is, kan de veldsterkte bij benadering gelijkgesteld worden aan U/d, waarin d de dikte van de laag is. De snelheid van de ladingdragers is dan $\mu U/d$ en de eis dat de oversteektijd kleiner dan de levensduur τ moet zijn, luidt dan in formule: $d^2/\mu U < \tau$. Bij een U-waarde van 10 V en een laagdikte van 10 μm, leidt dit tot de eis: $\mu\tau > 10^{-7}$ cm²/V.

De wijze waarop de fotostroom i_f die door de PbO-laag vloeit, afhangt van de lichtstroom L die erop valt, vindt men grafisch voorgesteld in *fig. 13*. In deze dubbellogaritmische grafiek blijkt het verband te worden voorgesteld door een rechte, d.w.z. het kan worden beschreven met een formule van de vorm $i_f \sim L^\gamma$. De waarde van de exponent γ ligt dicht bij één: in het algemeen vindt men γ-waarden

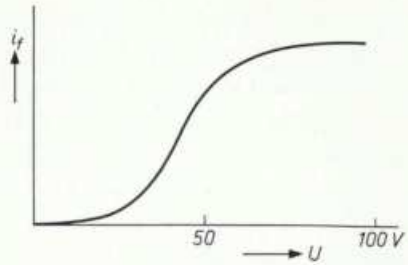


Fig. 12. Wanneer de *I*-laag te sterk *N*-geleidend is, krijgt de i_f, U-karakteristiek een „voet" en wordt de verzadigingswaarde van i_f eerst bereikt bij een hoge waarde van de aangelegde spanning. Dit effect is het sterkst voor blauw licht.

tussen 0,8 en 1,0. De fotostroom is dus nagenoeg evenredig met de opvallende lichtstroom, zodat voor de gevoeligheid van het „Plumbicon" één waarde kan worden opgegeven die voor alle lichtniveaus geldt [8]). De betekenis hiervan zal nader worden besproken in het aangehaalde artikel [2]). Voor de buis waarvan de karakteristiek in fig. 13 is weergegeven, is deze waarde 210 μA/lm. (Voor de gewone vidicons kan men niet één waarde opgeven; γ wijkt daar sterk af van één ($\approx 0{,}5$) en hangt bovendien van L af.)

Gebleken is dat voor buizen die op een en dezelfde wijze gemaakt zijn, de spreiding in de gevoeligheid zeer gering is, ten hoogste enkele tientallen μA/lm. Anderzijds kan men door wijziging van het opdamp-

[8]) Uit het feit dat i_f en L óók evenredig zijn als i_f kleiner is dan de verzadigingswaarde, volgt dat we waarschijnlijk te doen hebben met monomoleculaire recombinatie.

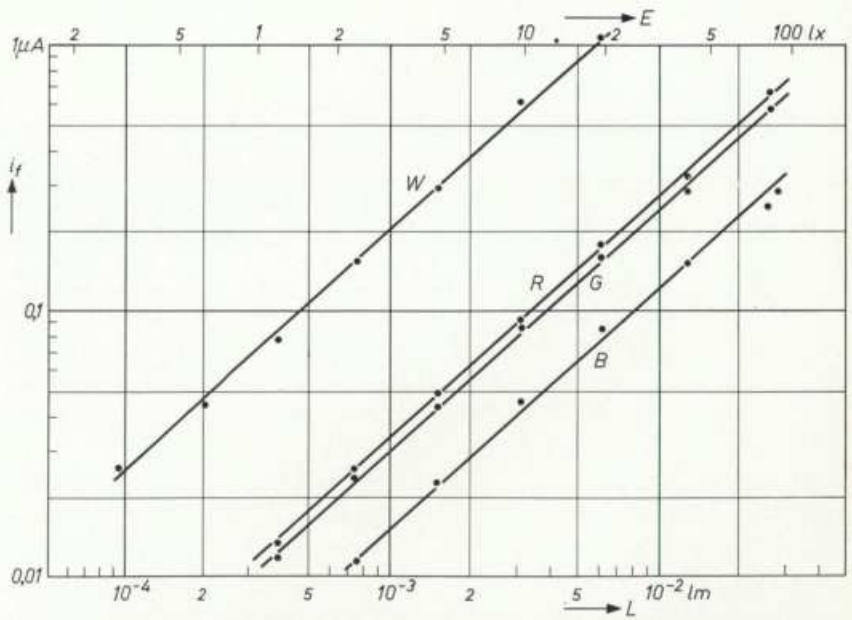


Fig. 13. Het bij een bepaalde aangelegde spanning gevonden verloop van de fotostroom i_f met de lichtstroom L (of de verlichtingssterkte E) voor wit, rood, groen en blauw licht (resp. de curven *W*, *R*, *G* en *B*). In tegenstelling met wat men bij de gewone vidicons ontmoet, zijn bij het „Plumbicon" L en i_f voor alle lichtsoorten nagenoeg evenredig ($\gamma \approx 1$). De curven *R*, *G* en *B* zijn op dezelfde manier verkregen als die van fig. 11. De absciswaarden zijn die welke golden voor het witte licht, d.w.z. vóór het tussenplaatsen van het filter.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

procédé of door vergroting van de laagdikte ook grotere waarden van de gevoeligheid realiseren (b.v. 400 μA/lm.)

Ook voor de afzonderlijke lichtsoorten heeft γ tennaastebij de waarde één.

De spectrale gevoeligheidsverdeling

Zojuist is reeds aangestipt dat de verschillende lichtsoorten in PbO niet in even sterke mate geabsorbeerd worden. De absorptie is sterker naarmate de golflengte korter is; globaal wordt blauw licht vrijwel volledig geabsorbeerd in de eerste 5 μm die het doorloopt, maar is er van rood licht aan de achterkant van de laag nog een flinke fractie over (*fig. 14*). Het is dus duidelijk dat men de spectrale

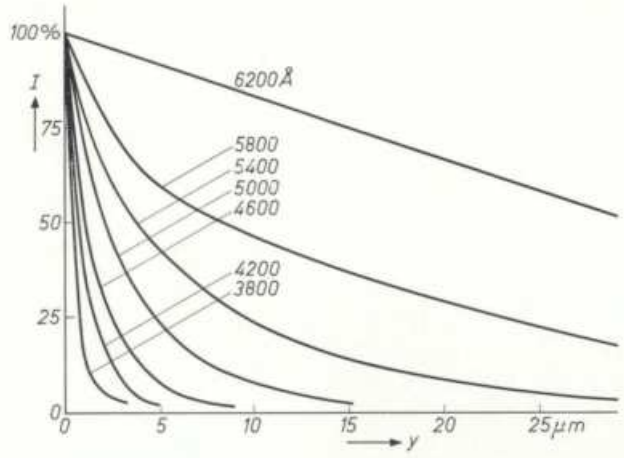


Fig. 14. De absorptie door PbO van monochromatisch licht van diverse golflengten. Uitgezet is het verloop van de intensiteit I met de weg y die in het PbO doorlopen is.

gevoeligheidsverdeling van een laag in vrij sterke mate kan beïnvloeden: een relatief grotere gevoeligheid voor rood licht bereikt men door de I-laag dikker te maken; de gevoeligheid voor blauw is zo groot mogelijk als de N-laag zo dun mogelijk is en, zoals reeds vermeld werd, een eventueel „veldvrij" gebied in de I-laag zich niet juist aan de zijde van het N-contact bevindt.

De bovengrens van het golflengtegebied waarbinnen de buis gevoelig is, valt ongeveer samen met die voor rood PbO — met een bandafstand van 2,0 eV correspondeert zoals gezegd, een grensgolflengte van 6200 Å. De ondergrens hangt af van de dikte van de N-laag en het potentiaalverloop in het aangrenzende deel van de I-laag. (Door de laag niet van PbO te maken maar van een materiaal met een kleinere bandafstand, kan de bovengrens, zonder dat koelen nodig is, naar aanmerkelijk langere golflengten verschoven worden. Zie daarvoor het aangehaalde artikel [4].)

In *fig. 15* vindt men de spectrale gevoeligheidsverdeling van twee buizen waarin de PbO-lagen opzettelijk op verschillende wijze waren gemaakt. De streeplijn stelt de ooggevoeligheidskromme voor. Curve *1* geldt voor een buis waarvan de PbO-laag volgens het standaardprocédé was gemaakt. Door het procédé zodanig te wijzigen dat de gevoeligheid voor blauw kleiner wordt — en eventueel die voor rood groter —, kan men de top van de verdelingskromme naar rechts doen schuiven. Men kan hierbij zelfs zo ver gaan dat de top rechts van die van de ooggevoeligheidskromme komt te liggen (curve *2*).

Doordat de spectrale gevoeligheidsverdeling van het (standaard) „Plumbicon" die van het oog aanmerkelijk beter benadert dan die van het gewone vidicon (Sb_2S_3) of van het beeldorthicon (Ag-Bi-O-Cs), geeft de buis bij gebruik voor zwart-wit-televisie een veel betere gradatie van de kleuren en behoeft men geen filters te gebruiken. Gebleken is dat de ten opzichte van het oog iets te geringe gevoeligheid in het rood ook voor de kleurentelevisie slechts zelden bezwaar oplevert [2]). In zo'n geval evenwel biedt een variant met grotere gevoeligheid voor rood licht uitkomst [4]).

Het scheidend vermogen

Een grens licht-donker in het beeld van de scène dat op het venster geprojecteerd is, wordt in het videosignaal niet met precies dezelfde scherpte teruggevonden. Behalve aan de eigenschappen van de elektrische apparatuur die op de opneembuis is aangesloten, en aan de eigenschappen van de elektronenbundel — factoren die we beide onbesproken laten —, is dit daaraan te wijten dat reeds in het ladingsbeeld dat tussen twee passages van de elektronenbundel op het vrije oppervlak van de fotogeleidende laag ontstaat, de corresponderende grens

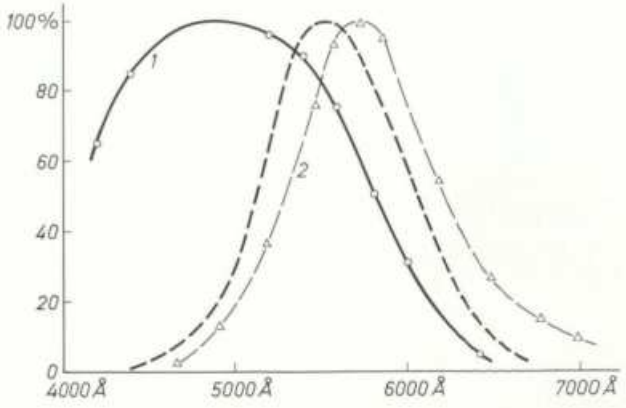


Fig. 15. De spectrale gevoeligheidsverdeling van twee buizen van het type „Plumbicon". De dikke streeplijn stelt de ooggevoeligheidskromme voor. Curve *1* geldt voor een buis waarvan de PbO-laag gemaakt is volgens het standaardprocédé. Desgewenst kan men de top van de curve naar rechts verschuiven (b.v. curve *2*), tot voorbij die van de ooggevoeligheidskromme.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

minder scherp is. Twee effecten zijn hiervoor aansprakelijk: in de eerste plaats wordt het licht in de PbO-laag min of meer verstrooid, en in de tweede plaats vindt er in de PbO-laag een zeker ladingstransport plaats evenwijdig met het oppervlak (dwarsgeleiding). Laatstgenoemd effect kan men nog splitsen in dwarsgeleiding in de *P*-laag en dwarsgeleiding in de *I*-laag.

Bij onderzoek blijkt dat de onscherpte door verstrooiing voor blauw licht aanmerkelijk geringer is dan voor rood. Maakt men de laag dunner, dan wordt de onscherpte voor rood kleiner, die voor blauw blijft gelijk. Een en ander is begrijpelijk als men bedenkt dat blauw licht veel minder diep in de laag doordringt dan rood (*fig. 16*).

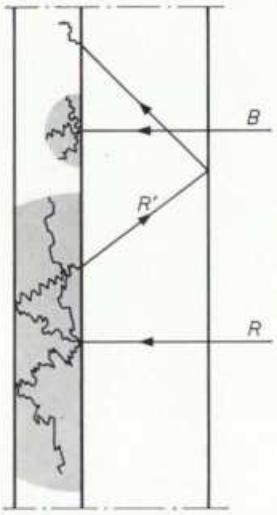


Fig. 16. Daar rood licht in PbO minder sterk wordt geabsorbeerd dan blauw, is de verstrooiing van rood licht (*R*) in de PbO-laag (in de figuur de strook tussen de linker verticaal en de middelste) voor het scheidend vermogen nadeliger dan die van blauw (*B*). De geschaduwde gebieden geven schematisch aan hoe groot de zones zijn waarin het verstrooide licht doordringt. Ook de nadelige invloed van licht dat door verstrooiing de PbO-laag aan de voorkant verlaat maar deze later, via reflexie tegen de voorzijde van het glazen venster (rechter verticaal), weer bereikt (*R'*), is voor rood door de geringere absorptie sterker.

Uit een oogpunt van scheidend vermogen is het dus goed de dikte van de laag zo klein mogelijk te maken. Dit leidt evenwel, zoals we zagen, tot een vermindering van de gevoeligheid voor rood licht en tevens tot een vergroting van de capaciteit van de laag. Om redenen die hieronder nog uiteengezet zullen worden, is ook dit laatste slechts in beperkte mate aanvaardbaar. Men is dus in de keus van de laagdikte niet geheel vrij. (Vervangt men het PbO weer door een basismateriaal dat rood licht veel sterker absorbeert [4]), dan vervalt deze moeilijkheid.)

De dwarsgeleiding in de *P*-laag kan uiteraard beperkt worden door deze laag zo dun mogelijk te maken, en verder is de dwarsgeleiding natuurlijk geringer naarmate de laag zwakker gedoteerd is. Dit laatste echter leidt op den duur tot een te grote donkerstroom, zoals we zagen. Ook uit een oogpunt van levensduur is het, naar nog zal worden uiteengezet, voordelig om de *P*-laag dik te maken en sterk te doteren. Hier is men dus in zijn keus eveneens niet geheel vrij.

Dwarsgeleiding in de *I*-laag treedt op wanneer daarin, door onvoldoende zuiverheid, een „veldvrije" zone aanwezig is. In deze zone zullen de ladingdragers gemakkelijk uitwaaieren in plaats van recht over te steken. Voor zover dit gebeurt met elektronen, levert het geen nadeel op; de plaats waar de elektronen de signaalplaat bereiken, is voor het scheidend vermogen niet van belang. De plaats echter waar de gaten het vrije oppervlak bereiken, is wel belangrijk: een gat dat niet recht is overgestoken, verandert de potentiaalverdeling op het vrije oppervlak van de laag op een wijze die niet correspondeert met de lichtverdeling in de scène. Ook uit een oogpunt van scheidend vermogen is het dus van belang dat de *I*-laag zo zuiver mogelijk is.

Alvorens waarden van het scheidend vermogen van het „Plumbicon" te vermelden, een enkel woord over de wijze waarop men dit in getallen uitdrukt. Stel dat het scherm van een buis verlicht wordt als is geschetst boven in *fig. 17*. Er zijn verticale lichte banden, gescheiden door even brede donkere. Op sommige delen van het scherm is de breedte van de banden zo dat ca. 20 paren van lichte en donkere banden een gehele beeldhoogte zouden kunnen vullen — in de televisietechniek noemt men dat 40 lijnen — op de andere is dit aantal 200 (400 „lijnen"). Passeert de elektronenbundel het corresponderende ladingsbeeld in de richting van de streeplijn, dan heeft

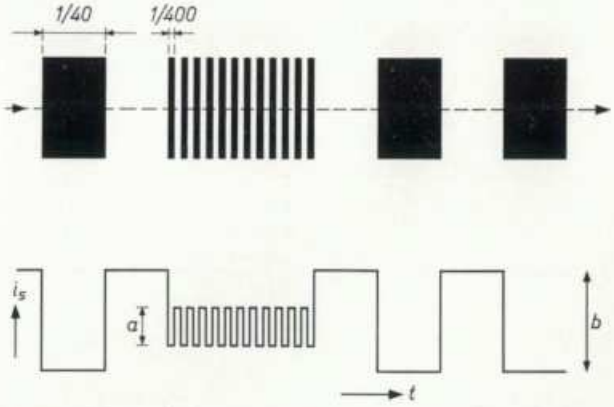


Fig. 17. Ter toelichting van de wijze waarop het scheidend vermogen van een televisie-opneembuis in een getal wordt uitgedrukt. Men beeldt op het scherm een systeem van verticale donkere en lichte lijnen af waarvan sommige een breedte hebben van 1/40 deel van de beeldhoogte en andere van 1/400 deel. Het lijnensysteem wordt afgetast in de richting van de streeplijn. Dit levert ter plaatse van de brede lijnen een wisselstroom met een grondfrequentie van 0,5 MHz en ter plaatse van de smalle een met een grondfrequentie van 5 MHz. Het gezochte getal, de zg. modulatiediepte, is gelijk aan de in procenten uitgedrukte verhouding van de amplitudes *a* en *b*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de signaalstroom (onder in fig. 17) de vorm van een wisselstroom met grondfrequenties van resp. 0,5 en 5 MHz. (Deze waarden gelden voor een systeem met 625 lijnen en een beeldtijd van 1/25 seconde.) Ter plaatse van de brede donkere banden correspondeert de signaalstroom nagenoeg met de donkerstroom, maar ter plaatse van de smalle is hij sterker. In de brede lichte banden is hij even sterk als ware het venster egaal verlicht, in de smalle echter is hij zwakker. Het verschil van de i_f-waarden voor licht en donker in de smalle banden noemen we a en dat in de brede banden b. Als maat voor het scheidend vermogen gebruikt men nu dikwijls de in procenten uitgedrukte waarde van de verhouding a/b, de zg. modulatiediepte.

Een gedetailleerd beeld van de eigenschappen van een buis, krijgt men als men a niet alleen beschouwt voor het geval met 400 lijnen per beeldhoogte, maar nagaat hoe de verhouding a/b verloopt als men de lijnbreedte een flink gebied van waarden laat doorlopen. Een voorbeeld hiervan, gemeten aan een willekeurige buis van het type „Plumbicon" vindt men weergegeven in *fig. 18*. Zoals men ziet, is bij 400 lijnen per beeldhoogte de verhouding a/b voor het onderzochte exemplaar ongeveer 45%. In het algemeen is deze verhouding niet kleiner dan ca. 35%.

De responsiesnelheid

Wanneer de lichtstroom die op de fotogevoelige laag van een opneembuis valt, plotseling van sterkte

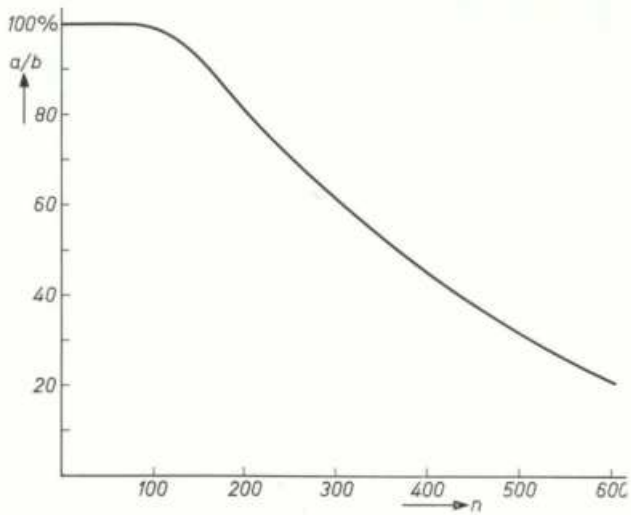


Fig. 18. Een gedetailleerde beschrijving van het scheidend vermogen van een opneembuis verkrijgt men door uit te zetten hoe de verhouding a/b varieert met de breedte van de smalle lijnen van het patroon van fig. 17. Deze breedte wordt uitgedrukt als het aantal n ervan dat een beeldhoogte zou vullen. De figuur toont het resultaat van metingen met wit licht aan een willekeurige buis van het type „Plumbicon" waarvan de PbO-laag 20 μm dik was. Door de onvermijdelijke bijdrage van de hulpapparatuur vindt men bij dergelijke metingen gewoonlijk een geringer scheidend vermogen dan overeenkomt met dat van de buis. Door uiterst zorgvuldig te meten, is dit verschil hier tot een minimum gereduceerd.

verandert, komt deze verandering niet oneindig snel tot uiting in de signaalstroom. Varieert de verlichtingssterkte op de laag volgens het in *fig. 19a* geschetste programma, dan kan men in het verloop van de signaalstroom de in 19*b* geschetste responsievormen ontmoeten. De namen die we aan de diverse traagheidseffecten gegeven hebben, vindt men in het onderschrift van de figuur.

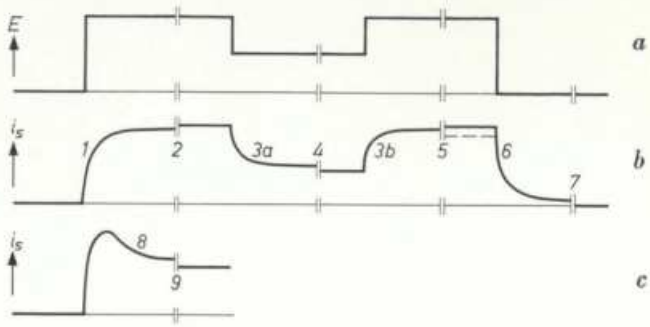


Fig. 19. De diverse soorten van traagheidsverschijnselen (responsievormen) die het „Plumbicon" in principe kan vertonen. In een goede buis zijn deze zo zwak dat ze niet storen en zijn sommige geheel afwezig. Het verlichtingsprogramma is weergegeven in (*a*): het licht wordt ingeschakeld, na lange tijd in sterkte verminderd, vervolgens weer op volle sterkte gebracht en tenslotte uitgeschakeld. De responsievormen zijn weergegeven in (*b*). De traagheidseffecten zijn: 1) opkomtraagheid, 2) opkomstaart (geringe toeneming over een lange periode), 3a) en 3b) tussentraagheid, 4) tussenstaart, 5) „inbranden" (kan ook bestaan in een verzwakking van het signaal), 6) eindtraagheid, 7) eindstaart. In plaats van (1) en (2) kan men ook hebben, zie (*c*): 8) vermoeidheid, met 9) vermoeidheidsstaart.

Uit praktisch oogpunt is een der meest belangrijke de „tussentraagheid". De „opkomtraagheid" nl. wordt alleen opgemerkt in ernstige gevallen, en de staart van de „eindtraagheid" kan men elektrisch wegwerken; de tussentraagheid echter doet zich in volle omvang gelden. Dit laatste geldt ook voor „inbranden" en „vermoeidheid".

Al de genoemde traagheidsverschijnselen zijn te beschouwen als de resultanten van twee componenten, die resp. hun oorzaak vinden in 1) het feit dat de elektronenbundel in de korte tijd waarin deze een bepaald beeldelement passeert, geen onbeperkt grote lading kan aanvoeren; deze component noemt men de straalstroomtraagheid, en 2) de aanwezigheid van vangcentra in de I-laag. In het „Plumbicon" zijn de bijdragen van beide soorten van traagheid tot een bevredigend kleine waarde teruggebracht.

De straalstroomtraagheid en die welke voortkomt uit de aanwezigheid van de vangcentra, worden beide geringer naarmate men een hogere spanning aanlegt, met dien verstande dat boven een zekere waarde van U de responsie niet veel sneller meer wordt. De registrogrammen van *fig. 20* tonen dit effect. Zoals men ziet, wordt de grootste responsiesnelheid reeds

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

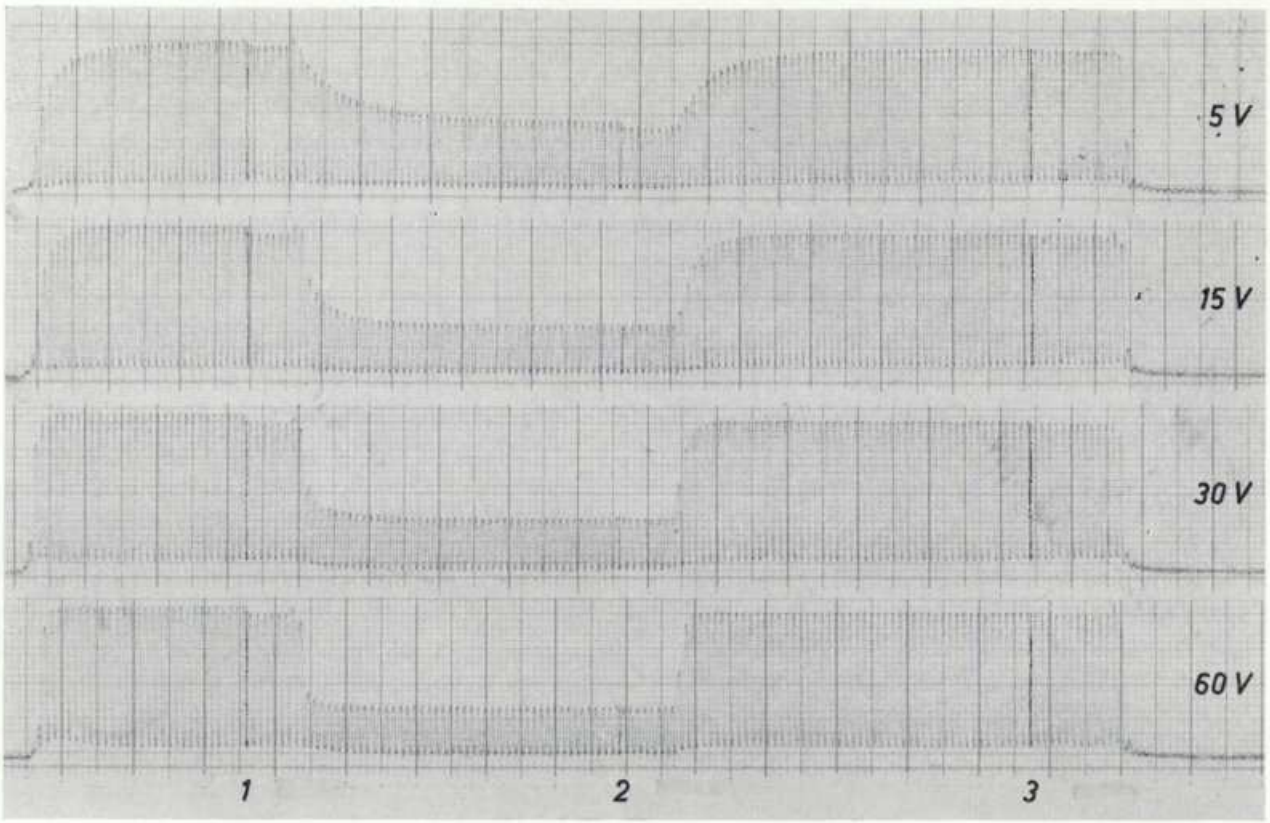


Fig. 20. De responsie van een buis van het type „Plumbicon" bij vier waarden van de spanning U over de PbO-laag, gemeten aan een willekeurig exemplaar. Reeds bij $U = 30$ V is een zeer geringe traagheid bereikt. Inbranden treedt nauwelijks op. De registrogrammen zijn verkregen door van een in werking zijnde buis alleen de bovenhelft van het scherm te verlichten. De signaalstroom bestaat dan uit een reeks impulsen met een periode van 1/50 s (een halve beeldperiode, en wel doordat er geïnterlinieerd wordt afgetast). Het verlichtingsprogramma was gelijk aan dat van fig. 19 en begon steeds met één minuut duisternis. Bij *1*, *2* en *3* werd steeds het registreren gedurende resp. 10, 10 en 30 s gestaakt.

bereikt als U de betrekkelijk lage waarde van 30 V heeft. Deze snelheid is zeer bevredigend: bij een overgang van sterke naar minder sterke belichting (tussentraagheid) heeft de verandering van de signaalstroom zich reeds na 3/50 s voor 95% voltrokken.

De straalstroomtraagheid

Bij de bespreking van de wijze waarop de evenwichtswaarde van de potentiaal van het vrije oppervlak van de PbO-laag tot stand komt, zagen we reeds hoe de stroom naar dit oppervlak afhangt van de potentiaal V ervan (fig. 3). Het ombuigen en vervolgens dalen van de kromme werd verklaard uit het toenemen der secundaire emissie. De stijging in het begin (V klein) wordt veroorzaakt door het feit dat de elektronen die de katode verlaten, niet in axiale richting alle dezelfde snelheid hebben: voor de axiale component van de snelheid geldt een quasi-Maxwell-verdeling. De vorm van het stijgende deel — d.i. het deel waarmee we in de praktijk te maken hebben — kan dan ook met goede benadering beschreven worden met een formule van de vorm $i_a = a\,e^{b\Phi}$. Hierin is de constante a een functie van de bundelstroom, de constante b is omgekeerd evenredig met de temperatuur van de katode; Φ is op een klein constant bedrag na gelijk aan V.

Voor het gebied van verlichtingssterkten waarvoor V klein is en de zojuist genoemde formule dus geldt, heeft de straalstroomtraagheid de volgende eigenschappen: hij is

1) onafhankelijk van de sterkte van de bundelstroom,
2) kleiner naarmate de capaciteit C van de laag kleiner is,
3) bij een overgang naar een lager lichtniveau kleiner naarmate dit niveau hoger ligt.
4) kleiner naarmate de temperatuur van de katode lager is.

Uit het tweede punt valt af te leiden waarom de traagheid bij toenemende spanning U aanvankelijk afneemt. Bij kleine U is er in de I-laag een veldvrij gebied hetwelk effectief tot het naburige contact gerekend moet worden. Bij toenemende U wordt dit gebied smaller. De afstand van de bekleedsels van de condensator wordt dan dus groter en de capaciteit kleiner, wat volgens (2) tot een geringere traagheid leidt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Is de verlichtingssterkte zo groot dat we ons in het gebied bevinden waar de i_a,V-kromme begint om te buigen, dan geldt (1) niet: bij grote verlichtingssterkten is de straalstroomtraagheid geringer naarmate de bundelstroom sterker is. Punt (2) — kleine capaciteit — blijft bij grote verlichtingssterkte geldig, punt (3) en punt (4) uiteraard niet.

Praktisch komt voor de verkleining van de straalstroomtraagheid alleen het verkleinen van de capaciteit in aanmerking. Wenst men dat bij een verandering van donker naar matig sterk licht (fotostroom b.v. 10^{-8} A) de karakteristieke tijd van de responsie kleiner is dan ca. 1/25 seconde, dan moet de capaciteit van de laag niet groter zijn dan ca. 2000 pF. Ook bij grote verlichtingssterkten blijkt de straalstroomtraagheid onbelangrijk te zijn als men de capaciteit beneden 2000 pF weet te houden.

Aan deze eisen kan met een laag die de beschreven *P-I-N*-structuur heeft, uitstekend voldaan worden. Is de laag b.v. 10 μm dik en is de *I*-laag zo zuiver dat er bij de waarden van U waarbij men in de praktijk werkt, b.v. 30 of 50 V, géén veldvrij gebied in deze laag is — bij de bespreking van de gevoeligheid zagen we dat deze zuiverheid inderdaad bereikt wordt —, dan is de capaciteit 1000 à 1500 pF.

De vier hierboven genoemde eigenschappen van de straalstroomtraagheid bij relatief kleine verlichtingssterkten kan men langs theoretische weg als volgt vinden. We nemen voorlopig weer aan dat de aanvoer van lading door de bundel continu geschiedt. Het gedrag van de potentiaal V van het vrije oppervlak van de laag voldoet (vergelijk fig. 2*b* en fig. 3 t/m 5) aan de differentiaalvergelijking:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C}(i_f - i_a).$$

(Hierbij is gedacht aan egale verlichting van de gehele laag; voor één beeldelement geldt echter hetzelfde: C en de stroom zijn dan eenzelfde factor kleiner.) Anderzijds geldt:

$$i_a = ae^{b\Phi}.$$

Stel nu dat de fotostroom i_f plotseling van de waarde i_1 op de waarde i_2 gebracht wordt door verandering van de verlichtingssterkte. Gevraagd wordt hoe i_a (aanvankelijk gelijk aan i_1) zich naar zijn nieuwe waarde (i_2) beweegt.

Lost men het stelsel vergelijkingen op, en elimineert men daarbij V, dan vindt men:

$$i_a(t) = \frac{i_2}{1-(1-i_2/i_1)\exp(-tbi_2/C)}. \quad \ldots \quad (6)$$

Uit deze formules zijn de vier eigenschappen direct af te lezen; men kan nl. aantonen dat formule (6) ook geldig blijft als in aanmerking wordt genomen dat de bundel de lading stootsgewijs aanvoert.

Mag, zoals boven bleek, de capaciteit van de laag niet te hoog zijn, er is ook een ondergrens. Ten einde een al te grote afbuiging van de aansnellende elektronen door naburige beeldelementen te vermijden, mag de variatie van V gedurende één beeldtijd niet al te groot zijn. Stellen we een grens van b.v. 10 V en eisen we dat een fotostroom van 10^{-7} A mogelijk moet zijn, dan mag C niet kleiner zijn dan ca. 800 pF.

De capaciteit van de PbO-laag in het „Plumbicon" heeft, zoals bleek, een zodanige waarde dat enerzijds de traagheid voldoende klein is en anderzijds de beinvloeding van de elektronenbundel door naburige beeldelementen verwaarloosbaar is. Het signaal dat een beeldelement afgeeft, hangt derhalve uitsluitend af van de hoeveelheid licht die erop valt en is onafhankelijk van zijn plaats, van zijn voorgeschiedenis en van de situatie in de aangrenzende beeldelementen. Dit is wat de buis zo uitzonderlijk geschikt doet zijn voor kleurentelevisie [2]).

Traagheid ten gevolge van vangcentra

Thans willen we wat nader ingaan op de traagheid die veroorzaakt wordt door de vangcentra. Uit de theorie der fotogeleiders [3]) is bekend dat de aanwezigheid van vangcentra in eerste instantie geen invloed heeft op b.v. de met een bepaalde verlichtingssterkte corresponderende concentratie van de elektronen in de geleidingsband, maar wel van invloed kan zijn op de snelheid waarmee, bij veranderen van de verlichtingssterkte, de nieuwe situatie zich instelt. Er bevinden zich meestal veel meer elektronen (voor gaten geldt een analoge redenering) in de vangcentra, concentratie c_t, dan in de geleidingsband, concentratie c_c. Wordt de verlichtingssterkte E nu vergroot, en wordt c_c derhalve groter, dan moet de verhouding c_t/c_c toch dezelfde blijven, hetgeen vereist dat het aantal in de centra gevangen elektronen met een, in absolute zin, groot bedrag toeneemt. Een groot deel van de door het licht na de vergroting van E vrijgemaakte elektronen wordt aanvankelijk hiervoor gebruikt, zodat c_c niet direct de waarde verkrijgt die met de verandering van E correspondeert. Daar de verhouding c_t/c_c evenredig is met de concentratie N_t der vangcentra, is de (absolute) afwijking van c_c op zeker tijdstip na het vergroten van E, groter naarmate N_t groter is. Een analoge redenering geldt wanneer E verkleind wordt; een groot aantal gevulde vangcentra moet dan „leegdampen"; de absolute afwijking van c_c is weer des te groter naarmate dit er meer zijn.

Daar c_c bij gegeven stroomsterkte kleiner is naarmate de aangelegde spanning U groter is, is het begrijpelijk dat deze traagheidseffecten minder sterk zijn als men U groot kiest.

Naast deze directe invloed van de vangplaatsen, die we niet nader zullen analyseren, is er ook een indirecte, die bij lage waarden van U duidelijk in de responsie van de buis tot uiting kan komen: door het vangen van ladingdragers door vangcentra kan

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het verloop van de elektronenenergie in de I-laag zo sterk veranderen dat het gedrag van de buis er merkbaar door wordt beïnvloed. Daar zo'n verandering uiteraard een tijdelijke is, die eerst optreedt na een verandering van E en tot stand komt met de snelheid waarmee een nieuwe waarde van de ruimtelading (c_e+c_t) zich instelt, heeft ze uiterlijk het karakter van een traagheidseffect. We zullen dit thans wat nader bezien en kiezen eenvoudigheidshalve als voorbeelden de vermoeidheid en de opkomtraagheid. Ter vermijding van misverstand wijzen we erop dat we bij deze discussie denken aan gevallen waarbij de aangelegde spanning U zo klein gekozen is dat er, gegeven de concentratie der verontreinigingen, een „veldvrij" gebied in de I-laag is.

De vermoeidheid, het na een snelle toeneming langzaam afnemen van de fotostroom, is een gevolg van zodanige vangst van ladingdragers dat het veldvrije gebied breder wordt. Er moet wat dit betreft onderscheid gemaakt worden tussen gevallen waarin de I-laag enigszins N-geleidend is en waarin deze enigszins P-geleidend is.

Is de I-laag enigszins een geleider van type N, dan is er, zoals we zagen, bij kleine U een veldvrije zone aan de kant van de N-laag. Door vangst van gaten wordt deze breder (zie *fig. 21a*), wat resulteert in een verminderde gevoeligheid, speciaal voor blauw licht.

Is de I-laag min of meer P-geleidend, dan is er een veldvrije zone aan de kant van het P-contact, die door vangst van elektronen breder wordt (fig. 21*b*). Dit leidt tot vermindering van de gevoeligheid voor rood licht.

Bij normaal gebruik van de buis is U zo groot dat een veldvrij gebied niet of nauwelijks aanwezig is; de beschreven effecten zijn dan van weinig belang.

Bij opkomtraagheid vindt, naast het directe effect van vangst, als neveneffect het tegengestelde plaats van wat we zojuist bespraken. Hier wordt door vangst van ladingdragers de veldvrije zone smaller en de gevoeligheid dus groter (zie *fig. 22*).

Het zal duidelijk zijn dat men uit de traagheidseigenschappen die een bepaalde proefbuis vertoont, conclusies kan trekken omtrent de aard van de I-laag. Vindt men b.v. tegelijkertijd vermoeidheid en opkomtraagheid, dan is dit een aanwijzing ervoor dat er vangst optreedt van beide soorten ladingdragers maar met verschillende waarschijnlijkheid.

Tot slot willen we erop wijzen dat er nog een traagheidsverschijnsel kan optreden dat weliswaar eveneens een gevolg is van een verandering in de bandkromming maar dat bij toenemen van U juist sterker wordt. Dit effect treedt op in oude buizen wanneer door langdurig gebruik het P-contact niet meer voldoende blokkeert. Wordt in zo'n geval, door

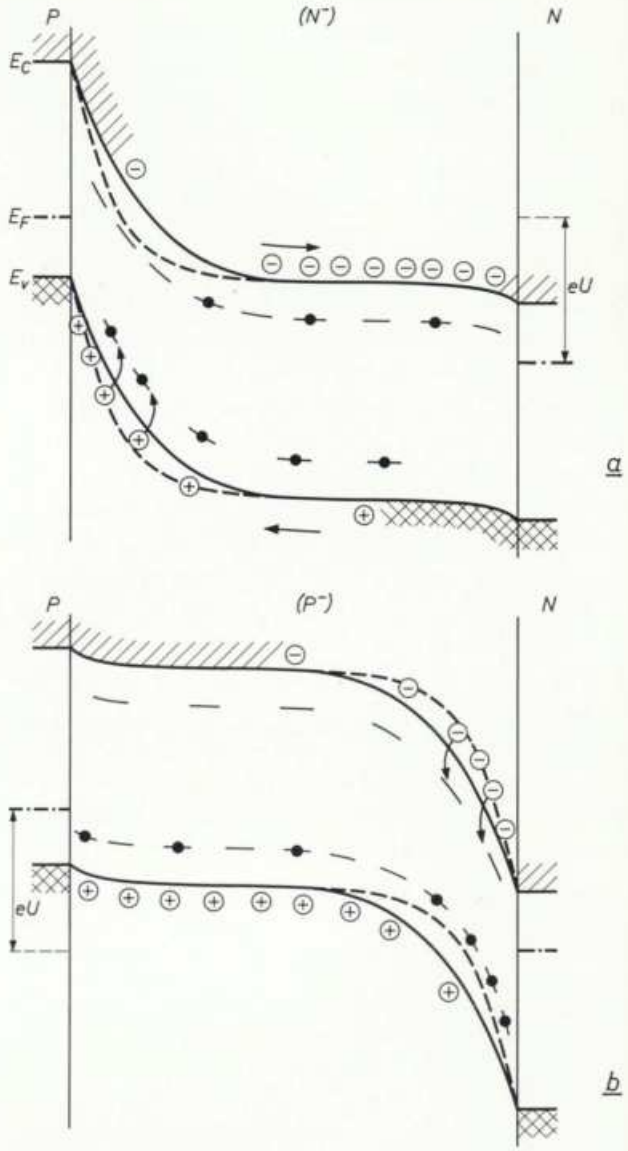


Fig. 21. Ter verklaring van het optreden van „vermoeidheid".

vangst van gaten, de hoogte A van de barrière wat verminderd, dan wordt A te klein en gaat er stroom lopen. Zolang de PbO-laag verlicht wordt en er dus ook een flinke fotostroom is, merkt men deze component niet op, maar na uitschakelen van het licht blijft hij aanwezig totdat de gevangen gaten de vangcentra weer verlaten hebben. Het optreden van een dergelijke „gestimuleerde donkerstroom" (een vorm van eindstaart) is volstrekt onacceptabel en wijst erop dat de buis aan het eind van zijn levensduur is gekomen. In het volgende hoofdstuk zullen we zien wat de oorzaak is van het achteruitgaan van het P-contact.

De constantheid van de eigenschappen; de levensduur

Het verloop in de tijd van de eigenschappen van een buis van het type „Plumbicon" wordt bepaald

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

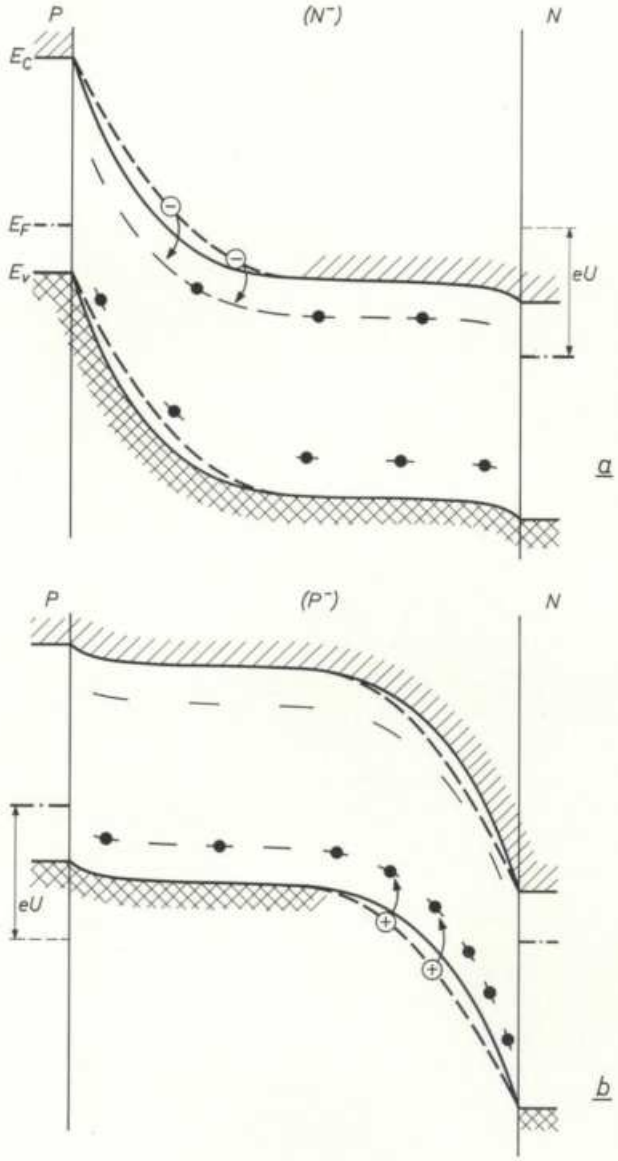


Fig. 22. Ter verklaring van „opkomstaart".

door de veranderingen die er in de PbO-laag optreden. We zullen de voornaamste daarvan thans de revue laten passeren en daarmee o.m. laten zien waardoor een buis op den duur onbruikbaar wordt.

De eerste oorzaak van veranderingen is diffusie van zuurstof, waar deze in de PbO-laag in overmaat aanwezig is. Het gevolg hiervan is dat kleine ongelijkmatigheden in de zuurstofconcentratie van de *P*- en de *I*-laag minder worden. Verder wordt de overgang tussen de *P*- en de *I*-laag minder scherp. Het verminderen van onregelmatigheden in de *I*-laag leidt uiteraard tot een gelijkmatiger potentiaalverloop en daarmee tot een grotere gevoeligheid en een geringere traagheid. Belangrijker dan de interne zuurstofmigratie — althans uit het oogpunt van levensduur — is het zuurstof**verlies** waaraan de PbO-laag blootstaat. Daar er in de buis geen gasvormige zuurstof van voldoend hoge druk kan bestaan — deze wordt direct gebonden door een als gasbinder fungerende bariumlaag of door het restgas —, vindt er een weliswaar langzame maar toch steeds voortschrijdende ontleding van het PbO plaats. Het sterkst is dit het geval in de *P*-laag die zich aan de zijde van het vrije oppervlak van de laag bevindt. Door de porositeit van de laag zullen echter ook de dieper gelegen delen daarvan, voornamelijk de *I*-laag dus, geleidelijk zuurstof verliezen. Het zuurstofverlies van de *P*-laag wordt sterk bevorderd door ionenbombardement wanneer de buis werkt. Verder is het niet ondenkbaar dat de *P*-laag enige zuurstof verliest door elektrolyse van het PbO.

Het zuurstofverlies van het PbO heeft tot gevolg dat de *P*-laag minder sterk *P*-geleidend wordt; hetzelfde geldt voor de *I*-laag, die immers ook enigszins *P*-geleidend is. Het is nu duidelijk waarom het ook uit een oogpunt van levensduur voordelig is de *I*-laag ietwat *P*-geleidend te maken. Een werkelijk intrinsieke *I*-laag zou door het zuurstofverlies aldra *N*-geleidend worden, wat, zoals we zagen, minder wenselijk is.

Het minder sterk *P*-geleidend worden van de *P*-laag is aanvankelijk geen bezwaar en in zeker opzicht zelfs een voordeel. Door het afnemen van het geleidingsvermogen wordt ook de dwarsgeleiding minder waardoor het scheidend vermogen beter wordt! Op den duur wordt echter de hoogte van de barrière te klein; men krijgt dan eerst het traagheidseffect dat we aan het slot van het vorige hoofdstuk bespraken („gestimuleerde donkerstroom") en vervolgens ook een te sterke donkerstroom. Hiermee is de buis dan aan het einde van zijn levensduur gekomen.

Een enkele maal wordt een buis onbruikbaar door plotseling optreden van een witte „spikkel". Dit is eveneens een te groot worden van de donkerstroom maar dan in een klein gebiedje. In het volgende hoofdstuk zal dit nog ter sprake komen.

In *fig. 23* vindt men het tijdsverloop van een aantal eigenschappen weergegeven. Zoals men ziet, is de levensduur te verdelen in twee duidelijk gescheiden periodes. In de eerste vindt een snelle verandering plaats, een soort formering. Gedurende deze periode verblijft de buis in de fabriek. In de tweede periode, de gebruiksperiode, blijven de grootheden die bepalend zijn voor de bruikbaarheid, zeer lang nagenoeg constant (gevoeligheid, scheidend vermogen) of nemen uiterst langzaam toe (donkerstroom, traagheden). De meest directe informatie omtrent de veranderingen die er in het begin in de laag optreden, kan men halen uit het tijdsverloop van de capaciteit, dat in fig. 23*e* is weergegeven. Daar de capaciteit omgekeerd evenredig is met de effectieve dikte van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

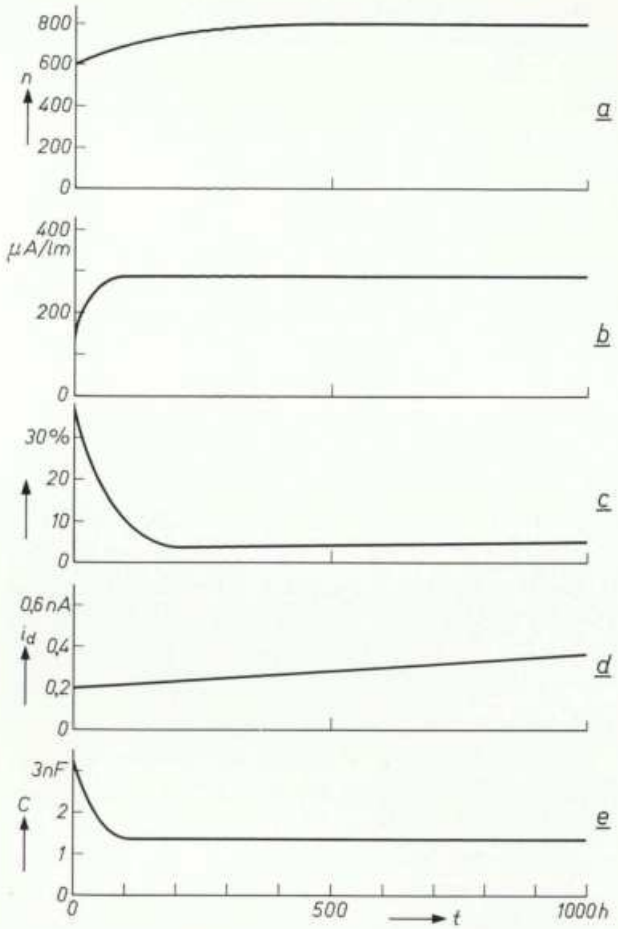


Fig. 23. Het verloop van diverse eigenschappen van de PbO-laag en van de capaciteit gemeten aan een willekeurige buis van het type „Plumbicon" gedurende de eerste 1000 uren dat de buis in werking was. *a*) Het scheidend vermogen, uitgedrukt als het aantal lijnen dat nog juist gescheiden is te zien (de verhouding *a*/*b* — zie fig. 18 — is daarbij ongeveer gelijk aan 5%). *b*) De gevoeligheid. *c*) De tussentraagheid, uitgedrukt als de fractie van de vereiste verandering van de signaalstroom in procenten die na 3/50 s nog niet gerealiseerd is. *d*) De donkerstroom. *e*) De capaciteit *C* van de PbO-laag. In het begin was er een sterke verandering — dit geldt algemeen; gedurende deze periode vertoeven de buizen nog in de fabriek — daarna bleven de eigenschappen, zoals men ziet, gedurende de tijd waarover de meting zich uitstrekte, vrijwel onveranderd.

de laag (formule 2), kan men via een capaciteitsmeting b.v. direct nagaan hoe deze gedurende de levensduur verandert. Overigens kan men de capaciteitsmeting ook gebruiken om na te gaan welke invloed de laag ondergaat van een variatie van U of van de verlichtingssterkte.

Spikkels

Zoals we zagen, kan de PbO-laag worden opgevat als een grote platte *P*-*I*-*N*-diode, of ook, dank zij de geringe dwarsgeleiding, als een groot aantal naast elkaar geplaatste kleine diodes, beantwoordend aan de beeldelementen. Voor het verkrijgen van een goed televisiebeeld is het noodzakelijk dat al deze kleine diodes ongeveer aan elkaar gelijk zijn. Wijken de eigenschappen van één beeldelement sterk af, dan ziet men in het beeld een stip. Al naar de aard van het defect is zo'n stip licht of donker, scherp of diffuus, constant of variabel van lichtsterkte. Is de variatie periodiek, dan spreekt men van een twinkelstip. We zullen nu kort een aantal mogelijke defecten de revue laten passeren en daarbij vermelden tot wat voor soort stip ze aanleiding geven.

De belangrijkste defecten zijn de volgende:

1) De *I*-laag is ergens zo sterk *P*-geleidend dat daar bij het *N*-contact een zeer steil potentiaalverloop is en dus een uiterst smalle barrière. In dit geval vloeit er een te sterke donkerstroom en is er dus een lichte stip. Deze sterke donkerstroom kan te wijten zijn aan het zg. lawine-effect (Eng.: avalanche effect) ten gevolge van de zeer grote veldsterkte, of aan het tunneleffect: als de barrière voldoende smal is, kan een gat dat een niveau in de geleidingsband van het *N*-gebied bezet, zich door het tunneleffect naar het *I*-gebied bewegen en daar terecht komen in een even hoog gelegen niveau van de valentieband (zie *fig. 24*). Vooral bij het lawine-effect is het zeer wel denkbaar dat de donkerstroom periodiek in sterkte varieert. In dat geval is de stip een twinkelstip.

2) De *I*-laag is plaatselijk relatief sterk *N*-geleidend; men heeft dan een analoge situatie maar nu aan de

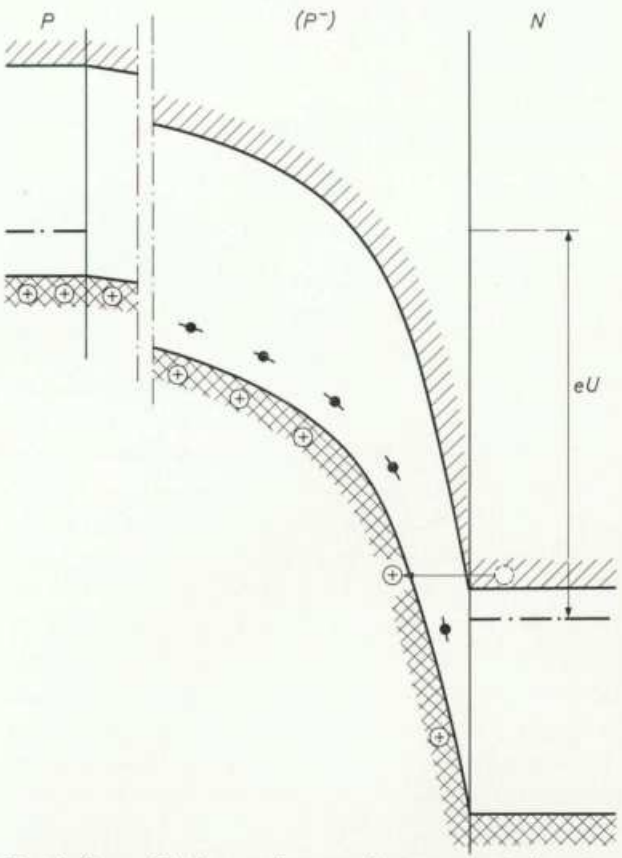


Fig. 24. Ter verklaring van het optreden van een sterke gatendonkerstroom als de middelste deellaag plaatselijk vrij sterk *P*-geleidend is. De barrière kan dan zo smal zijn dat het tunneleffect optreedt; zie het pijltje.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijde van de *P*-laag. De eventuele donkerstroom ten gevolge van het tunneleffect is nu niet een gatenmaar een elektronenstroom.

3) De *P*-laag is ergens te zwak gedoteerd. De levensduur van dit stukje van de PbO-laag is dan veel kleiner dan van de rest. Al spoedig gaat daar een sterke donkerstroom vloeien (lichte spikkel) waardoor de buis onbruikbaar wordt.

4) Het *P*-laagje is te dik (b.v. omdat het aanvankelijk overmatig sterk gedoteerd was). De *I*-laag is dan evenveel te dun en de gevoeligheid, vooral voor rood, kleiner dan elders. Dit leidt tot een donkere spikkel.

5) Het *N*-laagje is te dik. Dit leidt ook tot een verminderde gevoeligheid maar nu vooral voor blauw licht. Resultaat eveneens een donkere spikkel.

Behalve deze afwijkingen, die speciaal betrekking hebben op de meerdelige structuur van de laag, zijn er ook ettelijke defecten mogelijk van puur mechanische aard zoals b.v. de aanwezigheid van een stofdeeltje.

Door zeer zorgvuldig te werken in stofvrije ruimten en door ieder onderdeel nauwkeurig te controleren, hebben we de oorzaken van de defecten goeddeels kunnen elimineren, zodat de kwaliteit van de geproduceerde PbO-lagen, wat spikkels betreft, zeer acceptabel is.

Vatten we tot slot de besproken eigenschappen van opneembuizen van het type „Plumbicon" nog eens samen. De meerdelige bouw van de laag leidt tot een zeer kleine donkerstroom en tot een veel grotere gevoeligheid dan met een simpele *P*-*N*-overgang te bereiken is. Bovendien kan door een geschikte keus van de eigenschappen van de deellagen een zeer gunstige spectrale gevoeligheidsverdeling worden verkregen, en kunnen ook voor het scheidend vermogen en de responsiesnelheid zeer goede waarden worden bereikt. Het is daardoor thans mogelijk een kleine en lichte televisie-camera te construeren met zeer goede eigenschappen.

Verder hebben we gezien dat er een vrij grote variatiemogelijkheid is: sommige eigenschappen, zoals b.v. de spectrale gevoeligheidsverdeling, kunnen vrij sterk gevarieerd worden zonder dat dit een al te nadelige invloed heeft op de andere. Nog groter wordt de variatiemogelijkheid als men zich niet beperkt tot PbO als basismateriaal maar overgaat op PbO-bevattend materiaal met een kleinere bandafstand dan 2,0 eV [4]).

Dank zij deze mogelijkheid tot variatie van de eigenschappen is het thans mogelijk opneembuizen van het type „Plumbicon" te maken die b.v. een zeer groot scheidend vermogen paren aan een grote gevoeligheid, wat van belang is voor gebruik bij medisch röntgenonderzoek; of die een grote gevoeligheid paren aan een lange levensduur en daarbij toch nog redelijk snel zijn, wat van belang b.v. voor industriële televisie en voor verkeerscontrole bij avond; of die, met behoud van alle eisen die men in de studio stelt voor „levende uitzendingen", bij uitstek geschikt zijn voor gebruik in camera's voor kleurentelevisie.

Samenvatting. Het „Plumbicon", een nieuwe televisie-opneembuis, is een soort vidicon waarin de fotogeleidende laag bestaat uit microkristallijn PbO. Deze PbO-laag is samengesteld uit een *P*-geleidende zone aan de zijde van het kanon, een intrinsieke zone (*I*) en eventueel een dunne *N*-geleidende zone die tegen de signaalplaat aanligt. De laatste is van *N*-geleidend SnO_2. Het geheel vormt een *P*-*I*-*N*-diode: de *P*-laag belet elektronen de *I*-laag binnen te treden, de *N*-geleidende signaalplaat (c.q. de *N*-geleidende PbO-laag) belet dat gaten. Als de buis werkt, is deze *P*-*I*-*N*-diode in de keerrichting geschakeld, zodat de donkerstroom (d.i. de keerstroom van de diode) zeer klein is. De gevoeligheid, die bepaald wordt door de dikte van de *N*- en van de *I*-laag, en door het potentiaalverloop in de *I*-laag, kan meer dan 200 μA/lm bedragen; de spectrale gevoeligheid kan beter worden aangepast bij die van het oog dan het geval is bij de bestaande opneembuizen. De gevoeligheid voor blauw licht is groter naarmate de *N*-laag dunner is, de totale gevoeligheid neemt toe met de dikte van de *I*-laag. De γ-waarde ligt dicht bij één. Het scheidend vermogen en de responsiesnelheid zijn uitstekend (de modulatiediepte bij 400 lijnen is ca. 35%; de responsietijd ca. 3/50 seconde). De levensduur is groter dan bij andere buizen van studiokwaliteit. Op alle voor de omroeptelevisie belangrijke punten evenaart of overtreft het „Plumbicon" de bestaande buizen, het sterkst bij toepassing voor kleurentelevisie. De belangrijkste eigenschappen kunnen, zonder ernstige schade voor de andere, sterk gevarieerd worden, waardoor het mogelijk is buizen te maken die speciaal geschikt zijn voor zeer verschillende toepassingen. In nog ruimere mate is dit het geval wanneer men het basismateriaal vervangt door PbO-houdend materiaal met een kleinere bandafstand (minimum 0,9 eV).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

NIEUWE LAGERVORMEN: GASLAGER EN SPIRAALGROEFLAGER

door E. A. MUIJDERMAN *).

621.822.5:621.892.9

I. PRINCIPE VAN HET ZWEEFLAGER
II. GASLAGERS
III. SPIRAALGROEFLAGERS

Olie als middel tegen de wrijving kenden reeds de Egyptenaren, 40 eeuwen geleden. De gedachte om olie als smeermiddel te vervangen door lucht kwam pas op in de tweede helft van de 19e eeuw; zij werd geuit door Hirn. Doch niet alle voorwaarden voor de realisatie van zijn idee waren in die tijd vervuld. Eén voorwaarde was de ontwikkeling van een nieuw type lager, het zweeflager. Deel I van onderstaand artikel geeft de principes waarop het zweeflager berust.

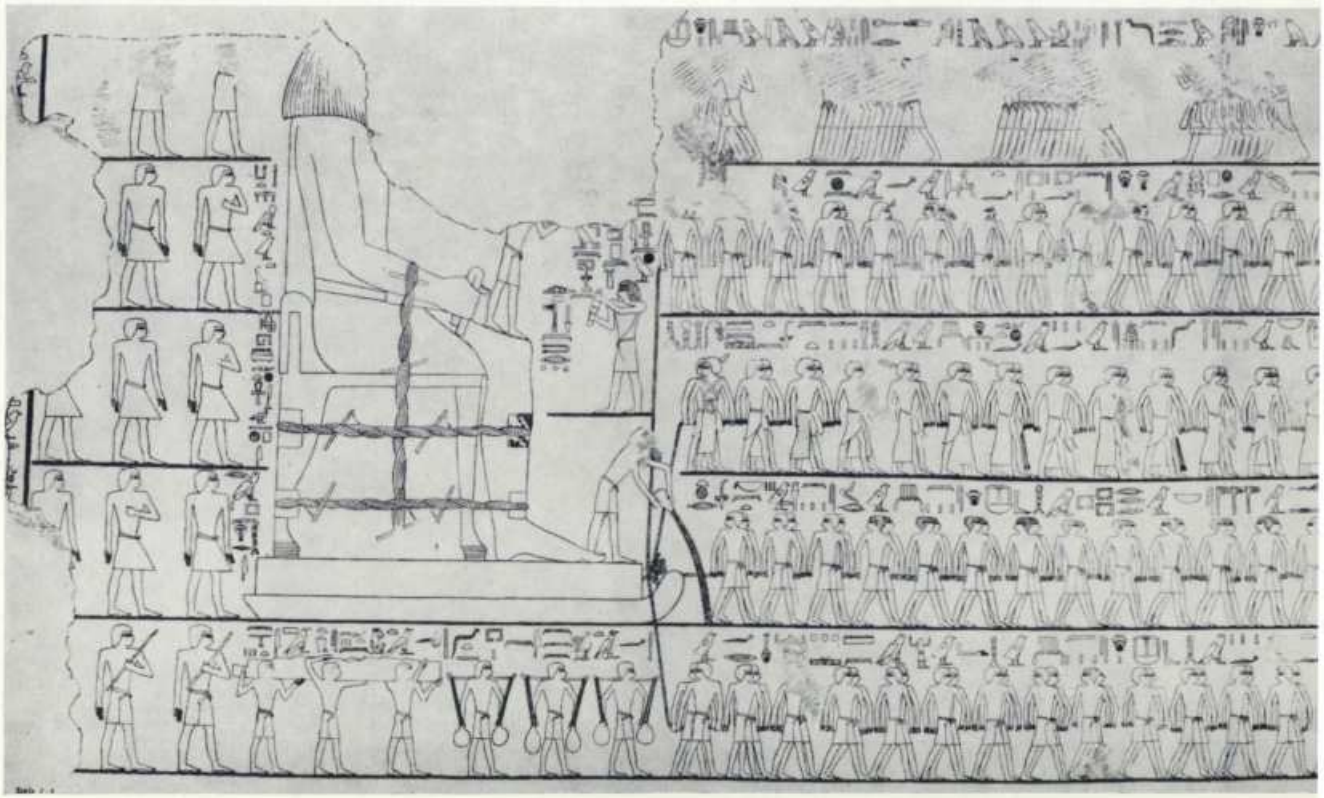
Decennia lang is het zweeflager in de praktijk uitsluitend in gebruik geweest met olie of andere vloeistoffen. De opkomst van op dezelfde principes gebaseerde lucht- of gaslagers (deel II) — voor de eerste maal gedemonstreerd in 1897, door Kingsbury — begint omstreeks 1950: ze worden thans toegepast b.v. in kernreactoren, in straalturbines, in gyrokompassen, bij de textiel- en levensmiddelenindustrie, en in tandartsboren.

Tegen deze achtergrond van nog zo kort geleden bereikte resultaten, beschrijft de auteur in deel III van het artikel een verdere ontwikkeling: het spiraalgroeflager. Hiermede worden nieuwe mogelijkheden geopend, enerzijds voor het verminderen van de wrijvingscoëfficiënt, anderzijds voor het verkleinen van de lagerafmetingen. Besproken wordt o.m. een, in het Natuurkundig Laboratorium ontwikkeld, bolvormig spiraalgroeflager met een diameter van slechts 3 mm.

I. PRINCIPE VAN HET ZWEEFLAGER

De ondersteuning van draaiende assen door middel van lagers gaat met wrijving en slijtage gepaard, en het behoeft geen betoog dat men deze door een of andere kunstgreep klein dient te houden. Smering met olie is zeer gebruikelijk (*fig. 1*), of wel men laat de as op kogels rollen (*fig. 2*), maar er zijn nog andere mogelijkheden. In dit artikel willen we ons bezighouden met lagers waarbij de kunstgreep erin bestaat de as en het lageroppervlak zorgvuldig van elkaar

*) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.



Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gescheiden te houden — wat met behulp van olie maar ook met allerlei andere media kan worden gerealiseerd.

Het oudste voorbeeld is de met olie gesmeerde as in een bus, het glij- of buslager. Dit lager gebruikte men reeds lang vóór men de theoretische grondslagen ervan had begrepen. In 1883 ontdekte Tower dat de gunstige eigenschappen hiervan niet, zoals men dacht, zómaar het gevolg zijn van de smering met olie. Men kan stellen dat het buslager als bij toeval voldoet aan die voorwaarden die maken dat as- en lageroppervlak elkaar (vrijwel) nooit raken. Ons huidige theoretische inzicht in deze voorwaarden stelt ons thans in staat een grote verscheidenheid van lagers te ontwerpen waarbij deze scheiding van as- en lageroppervlak fundamenteel is. Wij stellen voor, de naam „zweeflagers" hiervoor te gebruiken.

Tot de zweeflagers zou men ook moeten rekenen de magnetische lagers, waarbij de as door magnetische velden zwevend wordt gehouden. Deze lagers, die voor zeer bepaalde toepassingen in aanmerking komen, zijn reeds eerder in dit tijdschrift behandeld [1]). Wij beogen echter thans alleen die zweeflagers te bespreken waarbij een viskeus medium het lager en de as van elkaar scheidt. Voor dit doel kan zowel een vloeistof als een gas gebruikt worden, ook een gas heeft immers een zekere — zij het geringere — viscositeit. In dit artikel zal speciaal ernaar gestreefd worden de lezer meer vertrouwd te maken met de gassmering, die in toenemende mate in allerlei gevallen toepassing vindt [2]).

De zg. zweefvoertuigen (Hovercraft) bewegen zich voort op een luchtkussen, dat het voertuig van het oppervlak van land of zee scheidt. In tegenstelling tot de bovengenoemde zweeflagers berust deze scheiding niet of nauwelijks op viskeuze krachten, maar op traagheidskrachten van het medium. Een scheiding waarbij viskeuze krachten de belangrijkste rol spelen is alleen mogelijk bij een uiterst kleine afstand tussen de te scheiden oppervlakken.

Een nieuw ontwikkeld zweeflager, dat zowel met gas als met vloeistof en zelfs met vet kan werken, is het zg. spiraalgroeflager. De merites van dit nieuwe lager kunnen we in dit inleidende hoofdstuk slechts summier aangeven. Ze betreffen in het bijzonder de mogelijkheid van een kleine wrijvingscoëfficiënt en van kleine afmetingen. Zo zijn er goedkope, onverslijtbare en vrijwel wrijvingsloze spiraalgroeflagers gemaakt met een diameter van slechts 3 mm. Om de eigenschappen van het spiraalgroeflager goed duidelijk te kunnen maken, zullen we ze moeten beschouwen tegen de achtergrond van die van de zweeflagers in het algemeen.

[1]) F. Th. Backers, Een magnetisch aslager, Philips techn. T. **22**, 238-245, 1960.

[2]) Een der eerste, voor de tegenwoordige praktijk belangrijke, publikaties hierover is: G. W. K. Ford, D. M. Harris en D. Pantall, Proc. Inst. Mech. Engrs. **171**, 93, 1957.

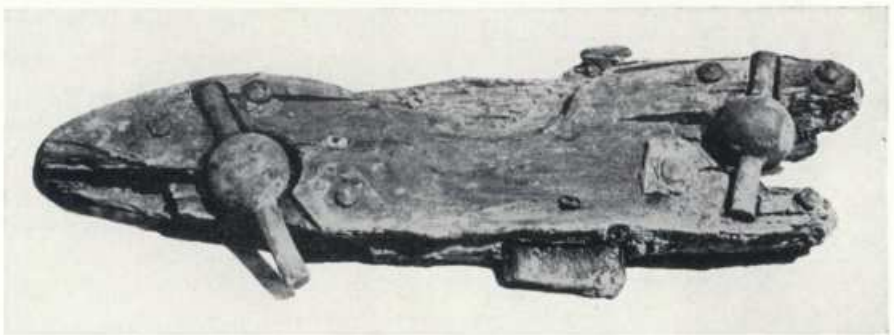


Fig. 2. Restant van een kogellager, gevonden in een der beide Romeinse schepen die men omtrent 1930 uit het meer van Nemi heeft opgegraven. Op grond van munten en inscripties die men in en om de schepen heeft gevonden, is het vrij zeker dat de schepen gebouwd zijn door keizer Caligula (ca. 40 na Chr.) en vergaan in de tijd van keizer Nero. Het afgebeelde kogellager (met kogels van 4,5 cm diameter) diende blijkbaar voor het ondersteunen van een draaiend platform. Daar ook de assen van de kogels een dragende functie hadden, was dit feitelijk nog pas een voorloper van ons tegenwoordige kogellager.

De schepen, ondergebracht in een speciaal museum, zijn in 1944 bij de gevechten rondom Rome door brand geheel verloren gegaan. Zie: G. Ucelli, Le navi di Nemi, Libr. dello Stato, Rome 1950, blz. 191 e.v. Uit dit boek is, met toestemming van de schrijver, de foto gereproduceerd.

←

Fig. 1. Egyptische graftekening van omstreeks 1650 v. Chr. Een slaaf giet olie voor de slede, waarop een standbeeld van farao Thot-hotep bevestigd is. Achter de slaven die de slede voorttrekken, zien we ook drie dragers met oliekruiken. Dit is de oudste bekende uitbeelding van het gebruik van olie als smeermiddel. (Gereproduceerd uit: P. E. Newberry, Archaeological Survey of Egypt, El Bersheh, part I. The tomb of Tehuti-Hetep.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

We bespreken thans achtereenvolgens twee categorieën: de zweeflagers met uitwendige drukbron, en de „zelfwerkende" zweeflagers. Vooral aan de laatste categorie zullen we aandacht schenken, daar de spiraalgroeflagers hiertoe behoren.

Zweeflagers met uitwendige drukbron

In 1878 werd op de Industriële Expositie te Parijs getoond hoe een zwaar voorwerp vrijwel zonder wrijving verplaatst kan worden over een glad stalen grondvlak. Het voorwerp steunde op het grondvlak met vier voeten, op de in *fig. 3a* voor één voet geschetste wijze. Om te maken dat de voet, die zijn

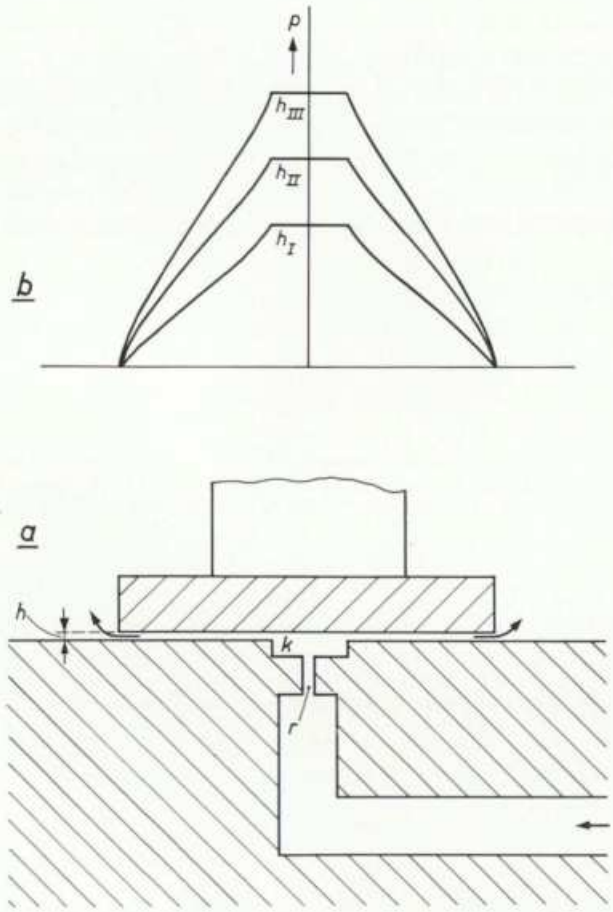


Fig. 3. *a*) Principe van een zweeflager met uitwendige drukbron, voor het eerst toegepast bij „Le chemin de fer en glace", een gevaarte dat op „leeuwevoeten" heel licht over een glad stalen oppervlak kon voortglijden en dat werd gedemonstreerd in 1878 op de Industriële Expositie te Parijs.

Een pomp, die een constante druk levert, perst een viskeus medium (in het genoemde geval olie) door een restrictie r, een kamer k en de spleet tussen de te scheiden oppervlakken (hoogte h) naar buiten. De restrictie r heeft een stabiliserende werking; deze werking blijkt uit (*b*).

b) De druk p in de spleet als functie van de plaats, voor drie waarden van de spleethoogte ($h_I > h_{II} > h_{III}$). Verkleining van de spleet geeft over de gehele linie een verhoging van de druk, zodat de verkleining wordt tegengegaan. (De getekende krommen gelden feitelijk voor het geval van een compressibel medium. De conclusie geldt echter evenzeer voor een incompressibel medium.)

deel van de gehele massa draagt, en het grondvlak elkaar niet raken, moet een pomp zorgen voor voldoende druk van het smeermiddel in de spleet ertussen. Aan deze eis van voldoende draagkracht is niet moeilijk te voldoen, maar ook moet worden voldaan aan de eis van stabiliteit: bij een verandering in de spleethoogte (laagdikte) h moeten er krachten ontstaan die de verandering tegenwerken, zodat de spleethoogte tamelijk constant kan blijven.

Het zou mogelijk zijn deze eigenschap te verkrijgen door te werken met een pomp die een constant debiet levert (b.v. een tandwielpomp). Bij verkleining van h neemt de weerstand in de spleet toe, en de hoeveelheid die de spleet uitstroomt zou bij gelijkblijvende druk verminderen (bij laminaire stroming evenredig met h^3). Daar dit onmogelijk is — de aanvoer blijft dezelfde —, ontstaat er een drukverhoging in de spleet, die de spleet weer wijder maakt.

Veelal (en speciaal bij een gas) werkt men echter met pompen die een constante druk leveren; met dit geval hebben we ook in fig. 3*a* te maken. Hetzelfde stabiliserende effect wordt nu verkregen door een vernauwing (de restrictie r) tussen de pomp en de spleet aan te brengen. Fig. 3*b* schetst hoe de druk verloopt over het dragende oppervlak, bij verschillende waarden van de spleethoogte h. Bij verkleining van de spleet neemt weer de druk in de spleet toe. Dit wordt begrijpelijk als men het drukverval vergelijkt met het spanningsverval in een elektrische stroomketen bestaande uit een bron van constante spanning, een constante weerstand (de restrictie) en een variabele weerstand (de spleet) in serieschakeling: vergroot men de variabele weerstand, dan komt een groter deel van de beschikbare totale spanning hierover te staan.

Zelfwerkende lagers

Bij de tweede categorie zweeflagers — de zelfwerkende — wordt de druk in het lager zelf opgebouwd. Er zijn daarbij nog verschillende mogelijkheden, maar als de belangrijkste bespreken we alleen de zelfwerkende zweeflagers gebaseerd op het vernauwings- of wigeffect.

Als we het blokje in *fig. 4*, dat een wigvormige ruimte insluit met het grondvlak, door een viskeus medium in de richting U langs het grondvlak voortbewegen, ontstaat er een opstuwing en daarmee een druk onder het blokje. We veronderstellen voorlopig dat het medium incompressibel is, dat de teweeggebrachte stroming stationair en laminair is, en we verwaarlozen de effecten ten gevolge van de eindige breedte L van het blokje. Bij een relatieve snelheid U tussen blokje en grondvlak, een dichtheid ϱ van het medium en een grootste en kleinste laagdikte (afstand

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

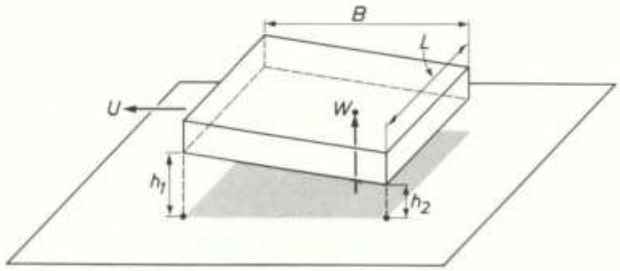


Fig. 4. Ter toelichting van het principe van een zelfwerkend lager, gebaseerd op het vernauwings- of wigeffect. Het blokje, dat in een viskeus medium is geplaatst en dat met het grondvlak een zich vernauwende ruimte insluit (in het getekende geval is deze spleet zuiver wigvormig), laat men bewegen met een snelheid U. Er ontstaat dan een overdruk tussen blokje en grondvlak, resulterend in een kracht W op het blokje (draagkracht).

Bij tegengesteld gerichte beweging van het blokje ontstaat in de spleet een onderdruk en derhalve een kracht op het blokje tegengesteld aan W.

tussen blokje en grondvlak) resp. h_1 en h_2 zou er, bij overal gelijke druk, aan de voorzijde per tijdseenheid de hoeveelheid $\frac{1}{2}\varrho ULh_1$ instromen en aan de achterzijde de hoeveelheid $\frac{1}{2}\varrho ULh_2$ uitstromen. Daar hiermee niet aan de continuïteitsvoorwaarde is voldaan — er zou meer instromen dan uitstromen —, moet er tussen het blokje en het grondvlak een drukverloop ontstaan, dat de snelheidsverdeling in de spleet zodanig bepaalt dat de in- en uitstromende hoeveelheden aan elkaar gelijk worden (*fig.* 5).

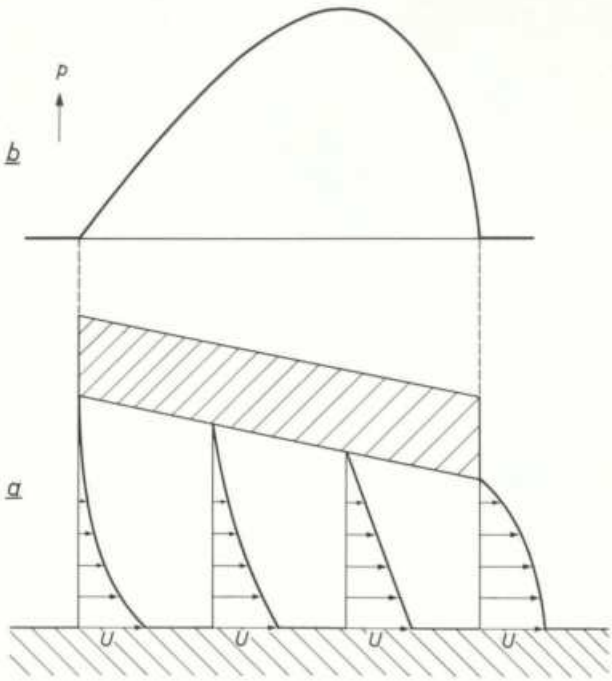


Fig. 5. *a*) Snelheidsverdeling en *b*) drukverdeling in het viskeuze incompressibele medium in de wigvormige spleet in fig. 4. Het blokje is in rust, het grondvlak beweegt met de snelheid U, het medium grenzende aan het grondvlak beweegt met dit vlak mee. De druk heeft ongeveer halverwege het blokje een maximum (de snelheid verloopt daar ter plaatse lineair over de spleethoogte).

Zoals gezegd, gebruikte men zweeflagers, nl. de buslagers, reeds lang vóór men de essentie van hun werking begreep. We weten thans dat bij het buslager de as door de belasting wat excentrisch komt te liggen en dat hierdoor tussen as en huis een vernauwing ontstaat analoog aan die tussen het besproken blokje en het grondvlak (*fig.* 6). Mits men het buslager maar voldoende smeert, kan het wigeffect ervoor zorgen dat de as en het huis elkaar niet raken. Vandaar het lange tijd onbegrepen feit dat bij de buslagers uit de 19e eeuw zoveel minder slijtage en wrijving ontstonden dan bij de axiale lagers uit dezelfde periode.

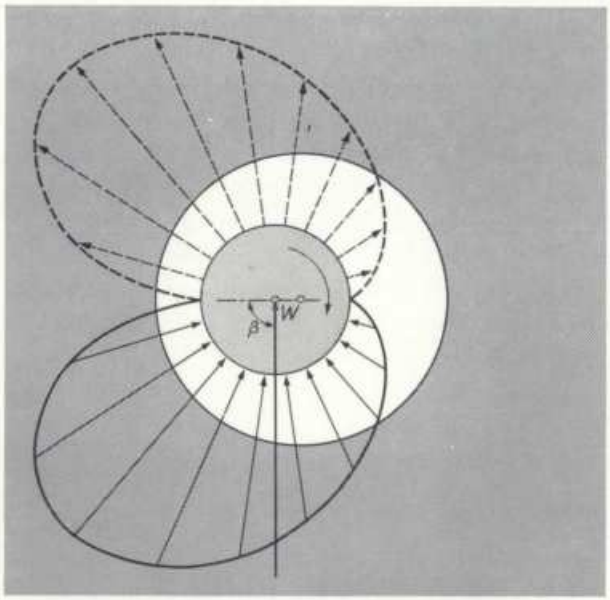


Fig. 6. Drukopbouw in een buslager met incompressibel medium, zeer schematisch voorgesteld. De getrokken pijlen geven een overdruk aan, de gestippelde pijlen een onderdruk. Overdruk ontstaat daar waar de spleet zich in de draairichting van de as vernauwt, onderdruk daar waar hij zich in deze richting verwijdt.

Hier is de theoretische mogelijkheid geschetst dat de twee drukprofielen precies elkaars spiegelbeeld zijn. In de praktijk zijn de opgewekte overdrukken veelal aanzienlijk hoger dan de onderdrukken — deze laatste nl. zijn begrensd door de dampdruk van het medium. Aan deze niet-symmetrische drukopbouw beantwoordt een andere evenwichtsligging van de as dan de hier getekende: de hoek β tussen de richting waarin de as het huis het dichtst nadert en de richting van de zwaartekracht wordt in dat geval kleiner dan 90°. Ook de compressibiliteit van het medium heeft invloed op de evenwichtsligging van de as. Voor een uitvoeriger bespreking van de drukopbouw in een buslager verwijzen we naar de literatuur [2]).

Tower heeft de grondslag gelegd voor dit inzicht, door de ontdekking dat de druk in een buslager lokaal (in de buurt van de vernauwing) aanzienlijk hoger kan zijn dan de druk die men berekent door de belasting te delen door de geprojecteerde oppervlakte van het lager. Hij werd op dit feit opmerkzaam toen hij een opening, die hij in een buslager had laten boren, met een kurk wilde afsluiten. Doordat de kurk zich herhaalde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

malen uit de opening werkte, kwam Tower op de gedachte dat de kurk onder hoge druk stond en dat dit de oorzaak zou kunnen zijn van de gunstige eigenschappen van het buslager. De experimentele gegevens over het drukverloop in het door hem onderzochte buslager, die hij in 1883-1885 publiceerde, trokken in ruime kring de aandacht. In het bijzonder ook van de theoreticus Reynolds, die erin slaagde reeds in 1886 de experimentele gegevens van Tower te verklaren, op basis van het besproken wigeffect [3]).

De nieuw verworven kennis zou een tiental jaren later benut worden voor axiale lagering. Men werkte toen aan het probleem, hoe de stuwkracht die het water uitoefent op de drijfas van een wentelende scheepsschroef, over te brengen op het schip. Dit gebeurde vóór 1898 in principe met behulp van twee parallelle vlakke schijven die onder oliesmering tegen elkaar gedrukt werden (*fig. 7*). De slijtage was aanzienlijk en de draagkracht (in dit geval de overgebrachte stuwkracht) zeer gering. Kingsbury (1898) en Michell (1905) kwamen onafhankelijk van elkaar op het idee één van de schijven te voorzien van een aantal, in een ring opgestelde blokjes die kunnen kantelen (*fig. 8*). Elk blokje geeft een wigvormige vernauwing in de ruimte tussen de schijven. Bij een geschikte plaatsing van de kantelribbe stelt het blokje zichzelf zo in dat de draagkracht onder de gegeven condities optimaal is. Aldus kan een volledige scheiding van de schijven worden gerealiseerd, ook bij uitoefening van een grote kracht op de schijven. In Europa noemt men dit type lager het Michell-lager [4]), in Amerika spreekt men meestal van Kingsbury-lager.

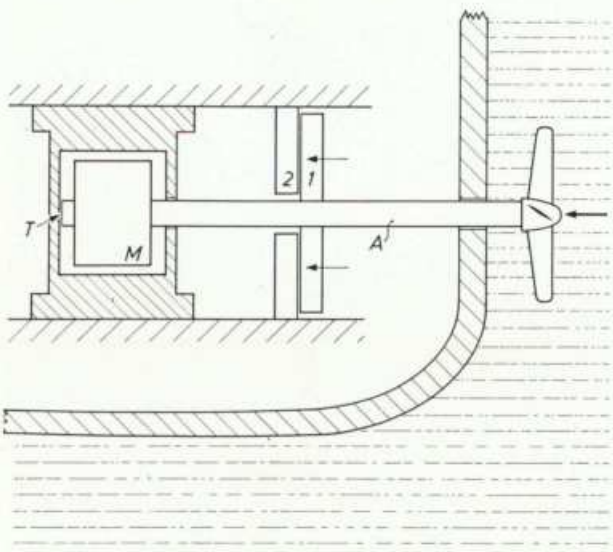


Fig. 7. De machine *M* van een schip drijft via de lange, in een tunnel door het schip gevoerde, as *A* de schroef aan. De door het water op de wentelende schroef uitgeoefende stuwkracht, die b.v. 150 of 200 ton kan bedragen, kan natuurlijk niet via het taatslager *T* van de machine op de scheepsromp worden overgebracht. Hiervoor dient veeleer een speciaal axiaal lager, dat in principe bestaat uit een schijf *1* die op de as is bevestigd en die tegen een stilstaande, stevig in het schip verankerde schijf *2* drukt. De aanzienlijke hierbij optredende slijtage gaf aanleiding tot de invoering van het Michell-lager.

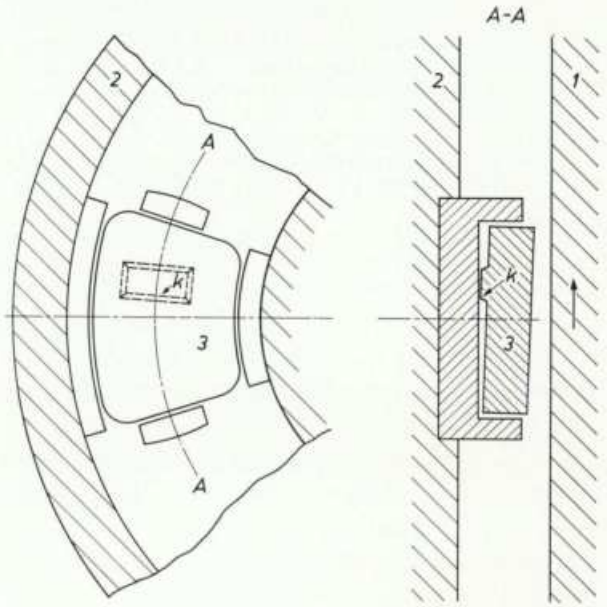


Fig. 8. Het Michell-lager bestaat uit een gladde schijf *1* en een schijf *2*, op de rand waarvan kantelbare blokjes *3* zijn aangebracht. De kantelribbe *k* van elk Michell-blokje wordt zodanig gepositioneerd dat het blokje zichzelf instelt op optimale draagkracht. Zie hiervoor de aangehaalde literatuur [4])[20]).

Een axiaal zweeflager van latere datum en eenvoudiger constructie is het stoeplager („step bearing"). Bij dit lager wordt de vernauwing, die essentieel is voor een zweeflager, teweeggebracht door rechthoekige dammen. De wigvorm van de tussenruimte is hier dus verlaten. Bij het hieronder te bespreken spiraalgroeflager wordt het wigeffect evenmin teweeggebracht met een wig in de eigenlijke zin des woords. Deze verschillen zijn echter niet wezenlijk. Voor het begrijpen van de fundamentele eigenschappen van het zelfwerkende lager kunnen we derhalve uitgaan van de wig-configuratie in fig. 4.

Integratie van de in de spleet opgewekte druk over het wigoppervlak, met lengte B, geeft voor de op het blokje uitgeoefende draagkracht W:

$$W = \frac{C_1 \eta U B^2 L}{h_2^2}, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

[3]) B. Tower, Proc. Inst. Mech. Engrs. **34**, 632, 1883; **35**, 29, 1884; **36**, 58, 1885. O. Reynolds, Phil. Trans. Roy. Soc. **177A**, 157, 1886.

[4]) Zie b.v. G. Vogelpohl, Betriebssichere Gleitlager, Springer, Berlijn 1958. — Voor een nadere bespreking van dit type lager zie vooral: H. W. Baron, De Ingenieur **75**, W 191, 1963 (no. 47).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waarin η de viscositeit is en C_1 in eerste benadering een functie alleen van h_1/h_2; de grootheden h_1, h_2, U en L hebben we boven al ingevoerd. Bij toepassing van een aantal blokjes in een axiaal lager kan men voor B de som van de gemiddelde tangentiële lengte van alle blokjes nemen en heeft dan de totale draagkracht van dat lager. (Neemt men de randeffecten in aanmerking — eindige waarde van L —, dan blijkt C_1 ook enigszins af te hangen van de verhouding L/B.) De wrijvingskracht F in hetzelfde lager is:

$$F = \frac{C_2 \eta U B L}{h_2}, \quad \ldots\ldots (2)$$

waarin C_2 eveneens een functie alleen van h_1/h_2 is. C_1 en C_2 noemen we de kengetallen van het lager. Naar gelang van de werkomstandigheden, d.w.z. het toerental (snelheid U) en de belasting (vereiste draagkracht W), zal het lager zich instellen op een verschillende waarde van de kleinste laagdikte h_2. Zijn de blokjes onwrikbaar aan de as (of aan het lager) bevestigd, dan is er tussen h_1 en h_2 een constant verschil en veranderen dus met h_2 ook de verhouding h_1/h_2 en de kengetallen C_1 en C_2. Zijn de blokjes kantelbaar, zoals in het in fig. 8 geschetste Michell-lager, dan kan h_1/h_2 bij alle instellingen constant blijven.

Het quotiënt van wrijvingskracht en draagkracht, $f = F/W$, noemt men de wrijvingscoëfficiënt van dit lager, aangezien het een enigszins analoge betekenis heeft als de bekende wrijvingscoëfficiënt in de droge wrijving. Uit (1) en (2) volgt:

$$f = \frac{C_2}{C_1}\frac{h_2}{B}, \quad \ldots\ldots (3)$$

en men constateert dus het, op het eerste gezicht misschien verrassende, feit dat de wrijvingscoëfficiënt van een lager *niet* afhangt van de viscositeit van het gebruikte smeermiddel, b.v. lucht of olie.

Voor het radiale lager met straal r, waarin een as met hoeksnelheid ω draait, kan men formules analoog aan (1) en (2) afleiden:

$$W = \frac{K_1 \eta \omega r^3 L}{(\Delta r)^2}, \quad \ldots\ldots (4)$$

$$P = \frac{K_2 \eta \omega^2 r^3 L}{\Delta r}. \quad \ldots\ldots (5)$$

P is hierbij het door de wrijving gedissipeerde vermogen en Δr is de speling die de as naar alle kanten heeft als hij midden in de lagerbus zweeft (halve montagespeling). In verband met de iets gewijzigde situatie en definities, vergeleken met het axiale wiglager, hebben we hier te maken met andere kengetallen, K_1 en K_2. Deze hangen nog af van de mate waarin de as in de smeerlaag doorzakt, d.i. de excentriciteit van de as in de lagerbus, een parameter analoog met de spleethoogte h_2 bij het axiale lager. (Neemt men de randeffecten in aanmerking — eindige waarde van L —, dan blijken K_1 en K_2 ook af te hangen van de verhouding r/L.) De excentriciteit zal zich weer instellen naar gelang van de werkomstandigheden, elk der kengetallen kan daarbij een reeks waarden aannemen, die in de praktijk ongeveer een factor 5 kunnen uiteenlopen.

Uit de formules kunnen dadelijk enige belangrijke conclusies worden getrokken.

Uit formule (1) of (4) lezen we af dat bij zelfwerkende lagers, om een zekere draagkracht te verkrijgen, de snelheid een bepaalde waarde zal moeten hebben. De derhalve onvermijdelijke slijtage bij aanlopen vanuit de stilstand is een belangrijke factor, die in deel II nog nader ter sprake zal komen. Uit formule (4) kunnen we echter tevens aflezen dat naarmate de montagespeling ($2\Delta r$) kleiner gemaakt kan worden, de gewenste draagkracht reeds bij kleinere snelheden wordt bereikt. Vooral bij gebruik van lucht (kleine η) betekent dit dat het maken van zeer nauwe lagerspleten een dwingende eis kan worden. In Amerika is men voor een speciale toepassing zo ver gegaan dat men een radiaal luchtlager ontwierp en realiseerde waarvan de montagespeling tussen as en huis slechts 0,6 μm bedroeg [5]). Dat dan wel het uiterste gevergd wordt van de bewerkingstechniek en de te gebruiken materialen (alleen keramiek komt in aanmerking), is duidelijk. Het is mede hierdoor dat de ontwikkeling van zweeflagers op lucht pas omstreeks 1950 goed op gang kwam.

Voor zeer grote snelheden (hoge toerentallen) kan formule (1) niet klakkeloos worden toegepast. Voert men bij gegeven belasting van het axiale lager het toerental op, dan zal de opgewekte druk in eerste instantie constant blijven doordat de kleinste laagdikte h_2 zich op een steeds grotere waarde instelt, telkens zodanig dat juist de nodige draagkracht verkregen wordt. In de praktijk is echter aan de toeneming van h_2 een grens gesteld, aangezien de as in het algemeen tussen twee axiale lagers opgesloten is. Heeft h_2 deze grens bereikt, dan zal bij verder opvoeren van het toerental de druk gaan toenemen, men krijgt een surplus van draagkracht dat generlei nut afwerpt, maar de verhoogde snelheid heeft blijkens formule (2) een verhoogde wrijving ten gevolge.

Iets dergelijks geldt voor het radiale lager als men de snelheid wil opvoeren, al is dit in formule (4)

---

[5]) Een ontwikkeling van Minneapolis-Honeywell Regulator Company; zie Machine Design **32**, no. 13, blz. 39, 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

niet zo duidelijk te zien. Bij gegeven belasting stelt de as, zoals boven reeds gezegd, zich in op een bepaalde excentriciteit in de lagerbus, waarbij het kengetal K_1 een bepaalde waarde heeft, zodanig dat juist de vereiste draagkracht verkregen wordt. Hoe hoger het toerental, des te kleiner worden de excentriciteit en ook het kengetal K_1, maar hieraan is een grens gesteld doordat de as hoogstens centrisch in het lager kan gaan draaien. Bij verder opvoeren van het toerental blijft K_1 constant en men krijgt weer een surplus van draagkracht, met een toeneming van de wrijving.

Bij deze beschouwingen zullen wij zo dadelijk in deel II van dit artikel aanknopen.

II. GASLAGERS

Lucht versus olie

In deel I hebben we trachten duidelijk te maken waarop de mogelijkheid van een lucht- of gaslager berust. Aan het begin van een nadere beschouwing van deze lagers is de vraag op zijn plaats, wat dan de voordelen zijn van het gebruik van lucht of een ander gas als medium voor een zweeflager.

Bij de reeds genoemde toepassing van een zweeflager die in 1878 te Parijs werd vertoond, vond de smering plaats met olie. De onder de voeten gepompte olie moest worden opgevangen in een reservoir en rondgepompt. Het is interessant om hier tegenover te stellen een volkomen analoge opstelling die thans gebruikt wordt voor een doel waaraan men in 1878 wel niet gedacht zal hebben, nl. een ruimtevaart-simulator (*fig. 9*). Het smeermiddel is hier lucht, die onder de voeten gepompt wordt. Men ziet hier dadelijk een prettige eigenschap die dit smeermiddel heeft: men kan het eenvoudig naar de omgeving laten ontsnappen, het behoeft niet opgevangen te worden, niet rondgepompt, en men is dus ook verlost van de complicaties die door een eventuele geleidelijke vervuiling van het smeermiddel ontstaan. In 1897 werd op deze eigenschap van het luchtlager reeds gewezen door Kingsbury, toen hij een met lucht gesmeerd buslager demonstreerde [6]): „De atmosfeer werkt als een bad van het smeermiddel, aldus een constante toevoer van constante kwaliteit onderhoudend". Vervuiling, maar nu niet van het smeermiddel doch van de omgeving, is eveneens het bezwaar dat olie, zelfs al tracht men de lagers nog zo zorgvuldig af te sluiten, onbruikbaar maakt b.v. in machinerieën voor de verwerking van voedsel of voor de fabricage van textiel of soortgelijke stoffen die beslist niet met olie in aanmerking mogen komen. Luchtsmering is in zulke gevallen de aangewezen oplossing.

Er zijn nog meer gevallen waarin smering met olie om zuiver praktische redenen niet in aanmerking komt en waar het gaslager dus een uitkomst biedt. Zo b.v. voor lagers die op zeer lage of zeer hoge temperaturen moeten werken, waarbij olie vast wordt of ontleedt. Soortgelijke gevallen zullen wij in het hoofdstukje over toepassingsvoorbeelden nog tegenkomen.

Daarnaast echter dient te worden gewezen op een belangrijk voordeel van gassmering boven oliesmering dat op theoretische gronden reeds kon worden voorzien, nl. dat gaslagers principieel beter geschikt zijn voor zeer hoge toerentallen. Dit hangt

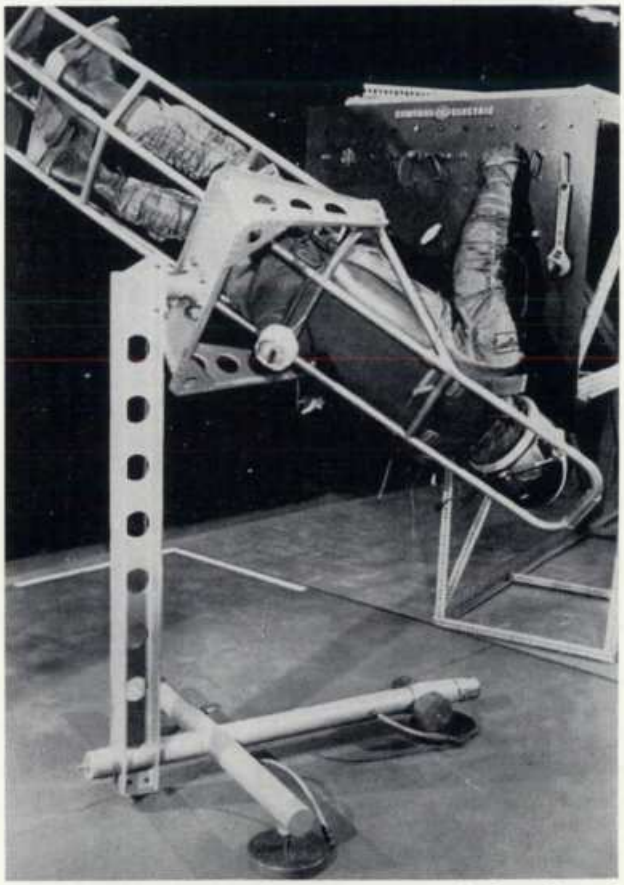


Fig. 9. Ruimtevaartsimulator, geconstrueerd door General Electric. De aanstaande ruimtevaarder is vastgegespt in een cardanisch gelagerd freem, dat steunt op voeten die door luchtsmering met uiterst geringe wrijving over de grond glijden. (De opstelling is geheel analoog met de eerder vermelde die in 1878 te Parijs werd vertoond.) Met dit toestel wordt één van de gevolgen van de gewichtloosheid onderzocht, nl. het ontbreken van wrijving, die de mens normaal voor het lopen en andere beweging nodig heeft. Bij de afgebeelde opstelling heeft alle beweging van een lichaamsdeel van de proefpersoon een verplaatsing van zijn overige lichaam in tegengestelde richting ten gevolge. Het blijkt mogelijk onder deze omstandigheden onderhoudswerkzaamheden te verrichten, doch deze kosten de proefpersoon 30 à 40% meer zuurstof dan normaal.

[6]) A. Kingsbury, Experiments with an air-lubricated journal, J. Amer. Soc. Naval Engrs. **9**, 267-292, 1897.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

samen met de begrenzing van de minimale laagdikte en van de excentriciteit, die aan het eind van deel I onder de aandacht is gebracht: bij opvoeren van het toerental gaat de as in een buslager ten slotte „centrisch lopen" (voor een axiaal lager geldt analoog dat h_2 niet meer kan toenemen). Gaat men dan nog verder met het toerental, dan wordt overtollige draagkracht geleverd en de wrijvingsverliezen P worden dan spoedig prohibitief. De voor de hand liggende remedie hiertegen is dat men het lager dunner en/of korter maakt (r en L kleiner), nl. zodanig dat géén overtollige draagkracht verkregen wordt. Kan men echter aan de afmetingen niet veel meer veranderen, omdat de mechanische sterkte niet in gevaar mag komen, dan is het enige middel tegen het centrisch lopen het overgaan tot een smeermiddel met kleinere viscositeit η: de olie is als het ware „te goed", hij levert bij hoge toerentallen te veel draagkracht. Met lucht, die een ongeveer 10 000 maal kleinere viscositeit bezit dan olie, zou blijkens verg. (5) voor gegeven wrijvingsverliezen het toerental onder overigens gelijke omstandigheden een factor 100 of de afmetingen van het lager een factor 10 kunnen worden vergroot. In werkelijkheid is de vergelijking van lucht en olie wel wat ingewikkelder, omdat men de gaslagers voor kleinere laagdikten zal dimensioneren, doch dit doet aan de conclusie niets af, en we zullen dan ook onder de toepassingsvoorbeelden van gaslagers de gevallen van uiterst snel draaiende assen een prominente plaats zien innemen.

Vergelijking tussen zelfwerkende gaslagers en gaslagers met uitwendige drukbron [7])

Het zelfwerkende gaslager onderscheidt zich van het gaslager met uitwendige drukbron door een eenvoudiger constructie en een grotere betrouwbaarheid (geen mogelijke stoornissen in de gastoevoer). Een ander belangrijk verschil tussen beide typen betreft hun gedrag bij het aanlopen. Wij hebben er reeds op gewezen dat blijkens formule (1) of (4) het zelfwerkende lager bij een snelheid nul geen draagkracht heeft; de draagkracht neemt (aanvankelijk lineair) met de snelheid toe. Bij het andere lagertype is de snelheid in eerste instantie niet van invloed op de draagkracht, doch slechts de door middel van de pomp verkregen druk. Bij het zelfwerkende lager gaat derhalve het aanlopen van de as met slijtage gepaard, en pas bij een zekere snelheid komt de as zover van het lageroppervlak los dat de gewenste geringe graad van slijtage en wrijving bereikt wordt. Dit betekent enerzijds dat het een vereiste is om met harde, weinig slijtende, lagermaterialen te werken [8]), anderzijds dat het lager zo ontworpen moet zijn dat de as bij zo laag mogelijke snelheid reeds loskomt. We vermeldden reeds dat men met het oog hierop lagers heeft geconstrueerd met bussen van keramiek en een montagespeling van slechts 0,6 μm.

Het is duidelijk dat door het genoemde verband de zelfwerkende lagers minder geschikt zijn als het gewenste toerental laag is, of als er grote variaties in toerental kunnen of moeten optreden.

Voor een verdere vergelijking van beide typen moeten we de compressibiliteit van het medium in rekening brengen.

Grenzen van de draagkracht

Bij de afleiding van formule (1) voor een wigvormige lagerspleet is uitgegaan van een *in*compressibel medium. We hebben op grond van de continuïteitsvoorwaarde gesteld dat het niet mogelijk is dat er een verschil $\frac{1}{2}\varrho ULh_1 - \frac{1}{2}\varrho ULh_2$ bestaat tussen in en uit de spleet stromende hoeveelheden, en we hebben verondersteld dat dit verschil gecompenseerd wordt door een in de spleet opgewekte druk (die de draagkracht levert) zonder dat de dichtheid ϱ daarbij verandert. Wat gebeurt er als we wèl met een variabele dichtheid moeten rekenen? Voorzover veranderingen in de dichtheid het bovengenoemde verschil mede gaan compenseren, gaat dit ten koste van de draagkracht. Naarmate we de snelheid verhogen, wordt de toeneming van de draagkracht hierdoor naar verhouding steeds kleiner, en de draagkracht nadert bij zeer grote snelheden tot een limiet, waarbij het bovengenoemde verschil uitsluitend wordt gecompenseerd door dichtheidsveranderingen. In dit limietgeval speelt dus de snelheid geen rol meer bij de drukvorming (evenmin als de viscositeit). *Alleen de druk p_i van de omringende atmosfeer is in dit limietgeval belangrijk.* Een eenvoudige afleiding [9]) leert dat de druk in de spleet onder deze omstandigheden nadert tot

$$p_{max} = p_i \frac{h_1}{h_2}. \qquad \ldots\ldots \quad (6)$$

Terwijl de draagkracht van het zelfwerkende lager op deze wijze is begrensd, kunnen we de draagkracht van een lager met uitwendige drukbron steeds verhogen door eenvoudig de pompdruk op te voeren.

Om redenen als deze zal het zelfwerkende lager in

[7]) De vergelijking geldt ongeveer zo voor zweeflagers werkend op een vloeistof, met dit verschil dat we bij een gas rekening moeten houden met de veel grotere compressibiliteit.

[8]) Deze eis weegt bij het met olie gesmeerde lager minder zwaar, omdat hierbij in de aanlooptoestand altijd nog een dun laagje olie voor een zekere vermindering van slijtage en wrijving zorgt („grenssmering").

[9]) Zie b.v. W. A. Gross, Gas film lubrication, Wiley, New York 1962, blz. 64.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de praktijk meestal bij een relatief geringe belasting worden toegepast, en is een lager met uitwendige drukbron veelal de aangewezen oplossing als het juist gaat om een relatief zware belasting.

De compressibiliteit is niet de enige factor die de draagkracht van het zelfwerkende lager beperkt. Andere begrenzingen treden aan het licht als de spleethoogte van dezelfde orde van grootte wordt als de gemiddelde vrije weglengte van de gasmoleculen. Ook kunnen begrenzingen voortkomen uit een geleidelijke overgang van viskeuze stroming naar traagheidsstroming (bij hoge toerentallen), een effect dat zich overigens ook bij lagers met uitwendige drukbron kan doen gevoelen, al heeft het daar niet direct een limiterende invloed. Op deze verschijnselen, die in extreme gevallen van belang worden, kunnen we hier niet nader ingaan, en we verwijzen ervoor naar de desbetreffende literatuur [9])[10])[11]).

Grenzen van de stabiliteit

Met de bespreking van de mogelijke instabiliteitsverschijnselen betreden we een moeilijk gebied, waar zeker nog niet alles begrepen is. Om hun grote belang moeten we ze althans vluchtig aanroeren, doch voor een nadere bestudering verwijzen we naar de desbetreffende literatuur [9])[11]).

Op zijn eenvoudigst voorgesteld, mag een zweeflager worden beschouwd als een massa-veer-systeem met demping. Zo'n systeem heeft een eigen frequentie, die volgens een welbekende formule ongeveer gelijk is aan $\sqrt{\text{stijfheid}/\text{massa}}$. Ondervindt het lager een periodieke storing, bij een radiaal lager b.v. als gevolg van een onbalans van de rotor, dan voert het systeem een gedwongen trilling uit, in casu met een frequentie gelijk aan het toerental. Wordt dit gelijk aan de genoemde eigen frequentie, dan geraakt het systeem in resonantie. Resonanties van dit soort zal men in het algemeen trachten te vermijden, door het lager zo te ontwerpen dat de eigen frequentie veel groter is dan de frequenties van de mogelijke storingen, of dat het gevaarlijke frequentiegebied snel gepasseerd kan worden.

Het systeem kan ook in een zg. zelfonderhouden trilling geraken, die niet berust op de aanwezigheid van een onbalans, maar die zijn oorzaak vindt in de aard van het verloop van de stabiliserende kracht bij variaties van de laagdikte. Bij het radiale zelfwerkende lager kan aldus, met name bij centrisch lopen — wat dus ook om deze reden ongewenst is —, het zeer gevreesde „warrelen" ontstaan, waarbij de hartlijn van de as om de hartlijn van het lager draait met een snelheid die bijna gelijk is aan de halve hoeksnelheid van de as („half-speedwhirl"). Hierbij neemt de amplitude van het „warrelen" geleidelijk toe en kan de as tegen het lager slaan. Bij de lagers met uitwendige drukbron bestaat óók het gevaar van het optreden van dergelijke trillingen, zowel bij radiale als bij axiale lagers, met name als de spleethoogte groot is of als het volume van de „kamer" (zie fig. 3) groot is. Dit instabiliteitsverschijnsel, dat te vergelijken is met allerlei bekende gevallen van relaxatietrillingen, staat bekend als het zg. luchthamereffect (omdat de luchthamer juist op het optreden van een dergelijke trilling gebaseerd is).

Door het optreden van instabiliteitsverschijnselen kan soms, in gevallen waar het ene type lager het meest geschikt lijkt, de schaal toch naar de andere kant doorslaan. Het beter begrijpen van de instabiliteitsverschijnselen bij zweeflagers is van het grootste belang voor hun verdere verbetering; op dit punt wordt dan ook een aanzienlijk deel van het tegenwoordige onderzoek in verschillende laboratoria gericht.

Voorbeelden van de toepassing van gaslagers

Een aantal toepassingen van gaslagers waarvoor niet veel toelichting nodig was, hebben we in het bovenstaande reeds vermeld. We zullen er nu nog enige beschouwen die ieder een bepaald aspect vertonen dat we naar voren willen halen.

Een spectaculaire, hoewel nog in experimenteel stadium verkerende, toepassing is de met gas gelagerde compressor. Dit is een typisch voorbeeld voor de wenselijkheid en mogelijkheid om bij hogere toerentallen te werken dan normaal: hierdoor kan men hogere drukken bereiken dan bij oliesmering [12]). *Fig.10* toont een viertrapscentrifugaalcompressor, die aan linker- en rechterzijde gelagerd is met axiale en radiale lagers. De toevoerleidingen van het lagergas, met manometers, zijn links goed te zien. Het is duidelijk dat het zelfwerkende lagertype voor deze toepassing niet zo geschikt zou zijn, daar compressoren doorgaans niet continu in gebruik zijn en men veel last van aanloopslijtage zou hebben. Een voordeel van met gas gelagerde compressoren is ook dat het verkregen gecomprimeerde gas geheel vrij van olie is. Bij gecomprimeerde zuurstof is dit van bijzonder groot belang, daar anders explosiegevaar bestaat.

Een zekere vermaardheid heeft gekregen de toepassing van zelfwerkende gaslagers in CO_2-circulatoren voor kernreactoren [2]). Zoals men weet, berusten de Britse kerncentrales, zoals die te Calder Hall, op deze koelmethode. Met olie gesmeerde lagers kwamen voor de CO_2-circulatoren niet in aanmerking, omdat olie onder invloed van radioactieve

[10]) Gas lubricated bearings, a critical survey, U.S. Dep. Commerce, Office of Technical Services, 1958.

[11]) O. Pinkus en B. Sternlicht, Theory of hydrodynamic lubrication, McGraw Hill, New York 1961.

[12]) E. Loch, Escher Wyss Mitteilungen **33**, no. 1/2/3, blz. 118, 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

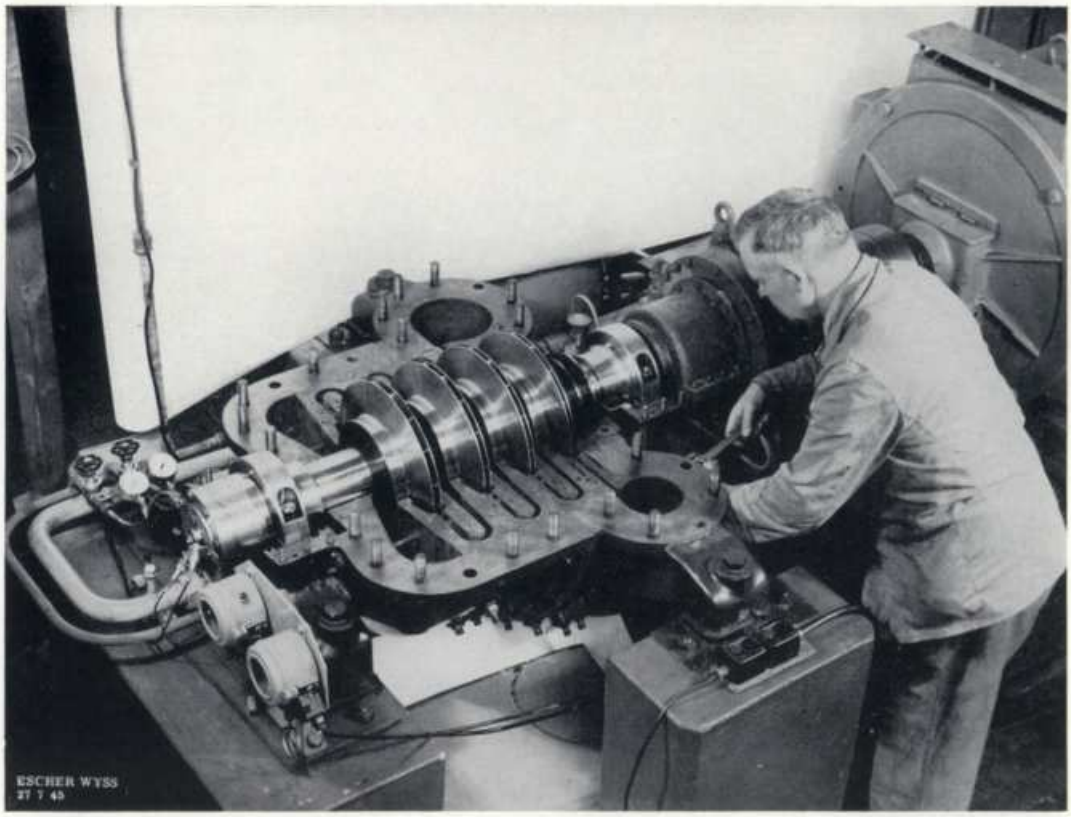


Fig. 10. Experimentele viertrapscentrifugaalcompressor van Escher Wyss, gedeeltelijk gedemonteerd. De compressor is axiaal en radiaal gelagerd met gas. Links toevoerleidingen van het lagergas, met manometers. Met deze compressor kunnen hogere toerentallen en daardoor hogere drukken bereikt worden dan met normale, met olie gesmeerde compressoren. Tevens kan gewaarborgd worden dat het gecomprimeerde gas volkomen vrij is van olie. (Ontleend aan E. Loch, Escher Wyss Mitteilungen **33**, no. 1/2/3, blz. 118, 1960.)

straling ontleedt. Dit feit heeft een belangrijke stoot gegeven tot de ontwikkeling van gaslagers, en de eerste succesvolle toepassing heeft indertijd sterk de aandacht getrokken. De lagers worden gesmeerd door het continu circulerende CO_2 zelf, en ze vormen met het gehele koelsysteem een gesloten eenheid, hetgeen van belang is om verspreiding van radioactieve stof tegen te gaan. *Fig. 11* toont de circulator met de lagering, bestaande uit twee buslagers *a* en *b* en een axiaal lager *c*. Dit laatste is een spiraalgroeflager, dat in deel III van dit artikel uitvoerig besproken wordt. *Fig. 12* is een foto van het roterende gedeelte van de CO_2-circulator, met op de voorgrond de twee bussen van de radiale lagers.

Ook in talrijke kleinere toepassingen vindt men tegenwoordig het gaslager. In ons laboratorium is o.a. een kleine experimentele rotor gemaakt die zowel gedreven als gelagerd wordt met perslucht (*fig. 13*). De geringe wrijving maakt toerentallen tot ongeveer 450 000 omw/min mogelijk zonder dat het lager te heet wordt. Bij de nieuwste types tandartsboren is men van dezelfde gedachte uitgegaan. Ook straalturbines en gyrokompassen worden met gas gelagerd in verband met de vereiste hoge toerentallen.

Een interessante categorie toepassingen van gassmering zijn die waarbij het niet in de eerste plaats gaat om de geringheid maar om de constantheid van de wrijving. Zulke gevallen ontmoet men vooral bij gevoelige metingen. *Fig. 14* toont het meten van het koppel, uitgeoefend door een zeer kleine elektromotor, met behulp van een wervelstroom-rembalans. Het te meten koppel is hier klein ten opzichte van het wrijvingskoppel dat zou optreden als men de draaibare rem zou lageren op kogellagers, en de onvermijdelijke kleine variaties in dit wrijvingskoppel zouden de meting zeer onbetrouwbaar maken [13]). Iets soortgelijks vindt men in de sensitometer die in *fig. 15* is afgebeeld [14]). Het gaat hierbij om het realiseren van een volkomen gelijkmatige translatiebeweging van een op een slede bevestigde sjabloon, die de belichtingstijd van het eronder geplaatste fotografische materiaal als functie van de plaats

[13]) Deze op wervelstroomdemping gebaseerde koppelmeter is ontworpen door W. Bähler van dit laboratorium.

[14]) Dit instrument heeft vorm gekregen in samenwerking tussen de fotochemische groep en de constructeurs van het Natuurkundig Laboratorium.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

varieert. Het voor ons gevoel vrijwel onmerkbare horten en stoten, waarmee een beweging van de slede op kogeltjes of een dergelijke lagering gepaard gaat, zou reeds ontoelaatbare discontinuïteiten in het verkregen zwartingsbeeld veroorzaken. Lucht als smeermiddel heeft in deze toepassing tevens het reeds genoemde voordeel dat het de (in casu fotografische) materialen die ermee in aanraking komen, niet verontreinigt. Als laatste voorbeeld in deze categorie zij vermeld een elders gerealiseerde opstelling voor het ijken van versnellingsopnemers [15]). De opnemer wordt gemonteerd op een slede die een nauwkeurig gedefinieerde sinusvormige trilling moet uitvoeren. Aandrijving met mechanische of elektrodynamische excitatoren blijkt diverse bezwaren te hebben, hetzij door de vervorming, hetzij door ruis en storingen door kogellagers enz. Bij de bedoelde opstelling wordt de slede weer op lucht gelagerd en tussen twee horizontale gespannen spiraalveren bevestigd; men geeft hem een uitwijking tegen een der veren in en laat hem dan vrij uittrillen. Dank zij de minimale en uiterst constante wrijving krijgt men blijkens de aangehaalde mededeling minutenlang een fraai sinusvormige trilling.

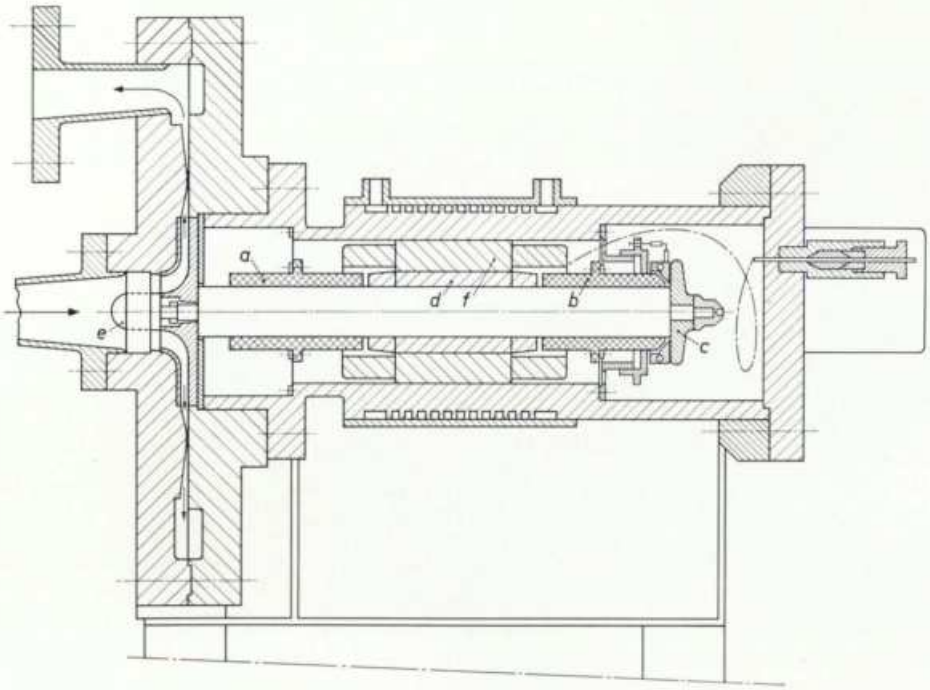


Fig. 11. CO_2-circulator voor een kernreactor. Het CO_2-gas, waarmee de reactor wordt gekoeld (of beter gezegd, waarmee de ontwikkelde warmte aan de reactor wordt onttrokken om nuttig te worden gebruikt), wordt rondgepompt door een radiaalwaaier *e*, die wordt gedreven door een elektromotor (stator *f*, rotor *d*). De pijlen geven de circulatierichting aan. Daar olie de neiging heeft te ontleden onder invloed van radioactieve straling, heeft men voor de circulatoren een lagering met gassmering toegepast, en wel laat men het circulerende CO_2 zelf voor de smering zorgen. *a* en *b* zijn de huizen van twee zelfwerkende buslagers, die de as dragen; *c* is een axiaal spiraalgroeflager (zie deel III van dit artikel). (Deze figuur en fig. 12 zijn ontleend aan: G. W. K. Ford, D. M. Harris en D. Pantall, Proc. Inst. Mech. Engrs. **171**, 93, 1957.)

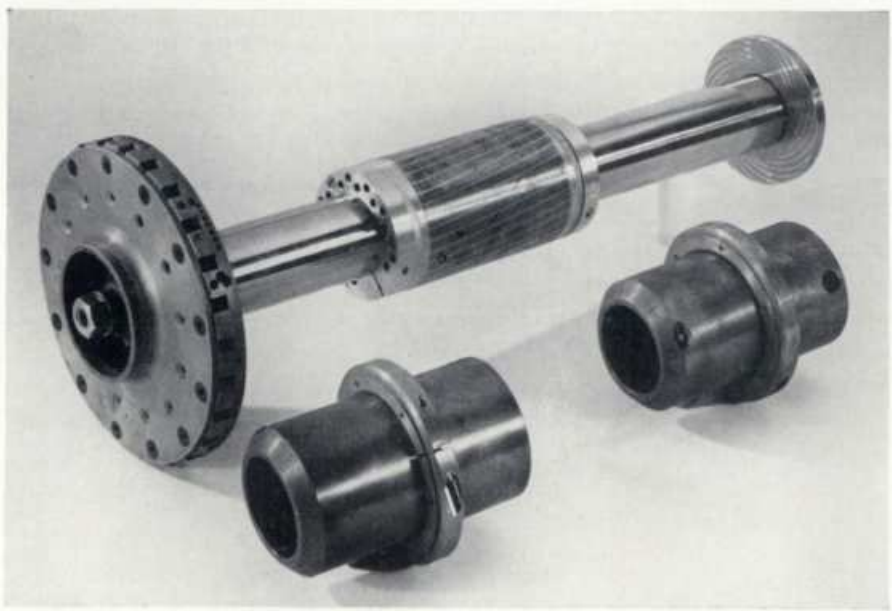


Fig. 12. Roterend gedeelte van de in fig. 11 getekende CO_2-circulator, waarvan de twee radiale en het axiale lager gesmeerd worden met het circulerende CO_2-gas. Op de voorgrond de bussen van de radiale lagers.

Bij de laatste toepassing die we willen bespreken, heeft men weer met een andere categorie te maken. Het betreft een toepassing die men o.a. vindt in trommelgeheugens van elektronische rekenmachines, b.v. bij de PASCAL. Bij deze trommelgeheugens dient een goede signaaloverbrenging gewaarborgd te worden tussen het magnetische oppervlak van een

[15]) TNO-Nieuws **18**, 154, 1963 (no. 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

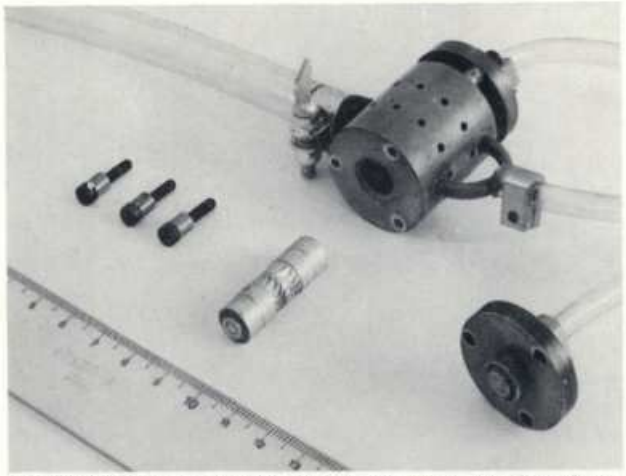


Fig. 13. Experimentele kleine rotor, gedreven en gelagerd met perslucht. Deze rotor kan ongeveer 450 000 omw/min maken. Op de voorgrond de as, waarin schoepen zijn uitgefreesd. Links achter ziet men de toevoerleiding voor de lucht die tegen de schoepen geblazen wordt. De vertakte leiding rechts voert de lucht aan voor radiale lagering van de as aan weerszijden van de schoepen. Van de twee axiale lagers is het voorste losgemaakt. In het midden van het losgemaakte lager onderscheidt men de vier kleine openingen waardoor de lucht wordt geblazen, de restricties (vgl. fig. 3).

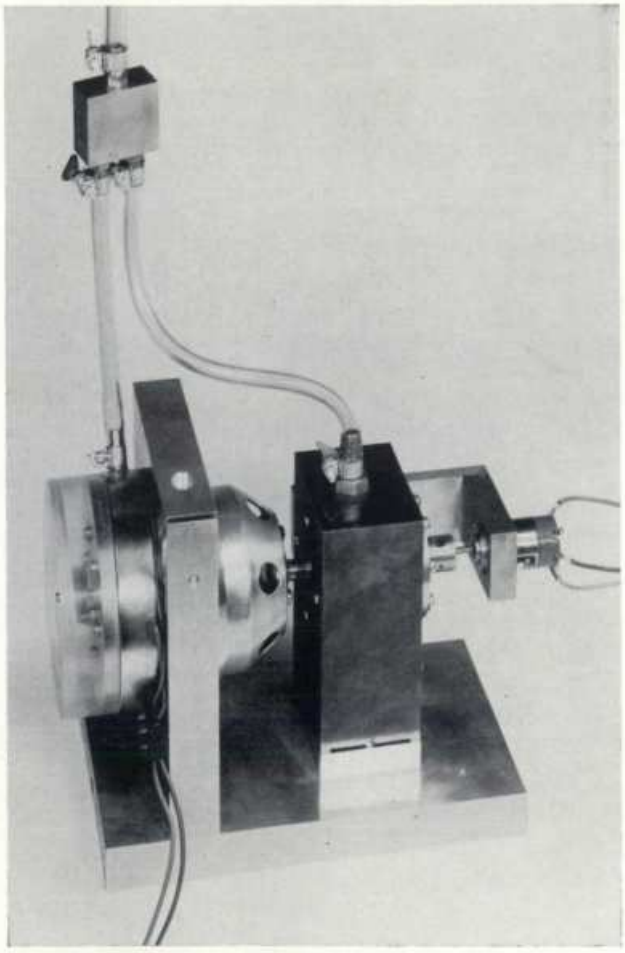


Fig. 14. Opstelling voor het meten van het koppel van een zeer kleine elektromotor, die zich geheel rechts in de houder bevindt. Het meettoestel (links) bevat een schijf, die met de motoras wordt gekoppeld en door wervelstromen met een instelbaar moment wordt geremd. Om storingen door ongelijkmatige lagerwrijving uit te sluiten, is de schijf radiaal met uiterst geringe wrijving met behulp van perslucht gelagerd.

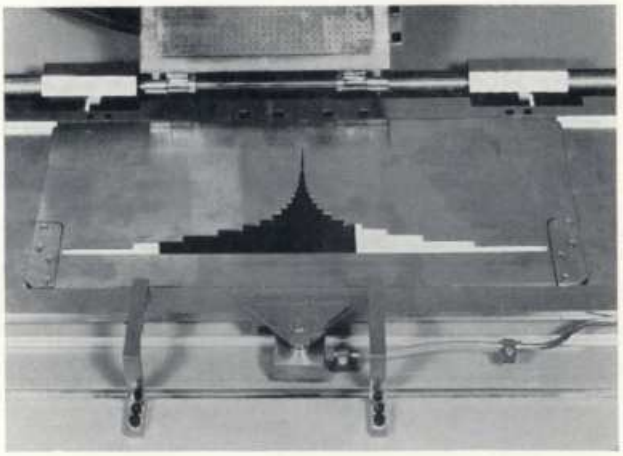


Fig. 15. Sensitometer ter bepaling van de gevoeligheid en andere karakteristieke eigenschappen van fotografische materialen. Het fotografische materiaal wordt door het erlangs trekken van een sjabloon aan een reeks toenemende belichtingen onderworpen, met straling van bekende spectrale samenstelling en intensiteit, afkomstig van een lichtbron onder de sjabloon (niet zichtbaar). Op het om scharnieren beweegbare rooster, dat men bovenaan in opgeklapte toestand ziet, wordt het fotografische materiaal vastgezogen. Voor de gewenste nauwkeurige graduering van de belichting (stappen in belichtingstijd) moet de sjabloon buitengewoon gelijkmatig worden voortbewogen. Hiertoe is de slede, waarop de sjabloon bevestigd is, gelagerd met twee busvormige lagers (als rechtgeleiding) en een vlakke voet, alle gesmeerd met lucht. Van deze voet is de toevoerleiding op de voorgrond te zien.

roterende geheugentrommel en een stilstaand magnetisch kopje („geheugenkopje"). Dit is slechts mogelijk indien het kopje en de trommel op een korte en zeer weinig variërende afstand van elkaar worden gehouden. Met de in de PASCAL toegepaste luchtlagering worden het kopje en de trommel op een afstand van 8 μm van elkaar gehouden [16]). Bij de eerder besproken toepassingen vloeide het constant houden van een bepaalde afstand voort uit de stabiliteitsvoorwaarde, die voor de werking van een zweeflager essentieel is. Bij de laatste toepassing is het handhaven van een bepaalde afstand in feite doel op zichzelf geworden.

We willen de werking van deze lagering nog iets meer in detail beschouwen, aan de hand van getalwaarden ontleend aan een experimentele opstelling. *Fig. 16* toont schematisch de lagering van een geheugenkopje. Een slappe veer (stijfheid $c_w = 1$ N/mm) wil het kopje (massa $m = 7$ gram) tegen de trommel drukken, terwijl de lucht in de enigszins wigvormige ruimte ertussen fungeert als een tweede, zeer stijve, veer (stijfheid $c_s = 400$ N/mm). De gewenste afstand (8 μm) wordt gehandhaafd zowel bij langzame veranderingen, b.v. door temperatuurschommelingen, als bij snelle, die het gevolg zijn van „rimpels" op het oppervlak van de ronddraaiende

[16]) De lagering is gerealiseerd door H. J. Hubers in dit laboratorium. Zie ook: J. H. Wessels, Een geheugenwiel voor magnetische registratie van televisiebeelden, Philips techn. T. **22**, 1-11, 1960, speciaal blz. 6. In het daar besproken geval werd een constante afstand van niet meer dan 1 μm gerealiseerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

trommel. Onderstel dat het oppervlak van de met een hoeksnelheid ω roterende trommel een sinusvormige rimpeling vertoont met amplitude $\hat{h}$ en met x rimpels op de omtrek. Onder invloed hiervan ondergaat het verende kopje een periodieke kracht en voert een eveneens sinusvormige trilling uit. Bij demping nul is het verschil tussen de amplitudes van beide trillingen:

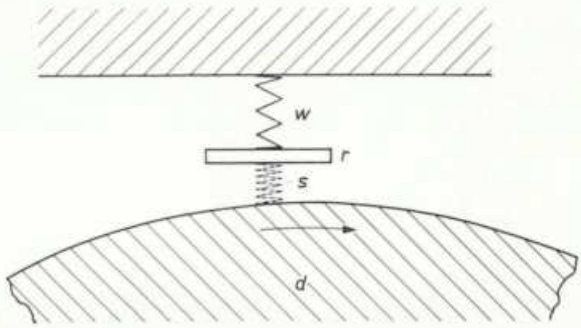


Fig. 16. Schematische voorstelling van de lagering van een geheugenkopje r ten opzichte van een geheugentrommel d, zoals die in de elektronische rekenmachine PASCAL is toegepast. w is een veer met geringe stijfheid, die het kopje tegen de roterende trommel aan wil drukken. Ten gevolge van het vernauwingseffect fungeert de lucht tussen het kopje en de trommel als een zeer stijve veer s. Aldus wordt gerealiseerd dat het kopje met uiterst geringe variaties op de gewenste afstand van 8 μm van het plaatselijke trommeloppervlak wordt gehouden.

$$\hat{\Delta y} = \frac{(x\omega)^2/\omega_n^2}{1-(x\omega)^2/\omega_n^2}\,\hat{h},$$

waarin ω_n de resonantie-hoekfrequentie van het kopje is:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{c_s + c_w}{m}}.$$

Aangezien in het door ons beschouwde geval geldt $c_w \ll c_s$, mogen we voor ω_n schrijven:

$$\omega_n \approx \sqrt{\frac{c_s}{m}} \approx 6000 \text{ rad/s}.$$

Na invullen van deze waarde (die ook ongeveer geldt voor de werkelijke uitvoering van de lagering bij de PASCAL) en b.v. $\omega = 300$ berekenen we dat bij een aantal van 3 rimpels op de omtrek, het geheugenkopje een trilling uitvoert waarbij het de rimpeling zo nauwkeurig volgt dat de variatie in afstand tussen het kopje en het plaatselijke trommeloppervlak slechts ongeveer 3/100 bedraagt van de rimpel in het trommeloppervlak.

Met dit voorbeeld willen we het gedeelte van dit artikel dat gewijd is aan gaslagers besluiten, om in het volgende deel de aandacht te richten op spiraalgroeflagers.

III. SPIRAALGROEFLAGERS

Aanleiding van het onderzoek

De werkzaamheden in het Natuurkundig Laboratorium aan spiraalgroeflagers begonnen toen ons in 1960 het probleem werd voorgelegd: is het mogelijk een niet-slijtend axiaal lager te maken, geschikt voor ongeveer 1 kg axiale belasting en minstens 50 000 omwentelingen per minuut, terwijl niet meer dan ongeveer 1,5 watt aan vermogen mag worden verbruikt? Het lager zou gebruikt worden voor een niet-doorgaande as, en moest ook kunnen werken in vacuüm.

We zullen eerst laten zien dat het hier gaat om een probleem dat zich moeilijk met een tot dusver besproken lager laat oplossen. Noch lagers met zg. „droge wrijving", noch kogellagers enz. komen in aanmerking wegens hun slijtage, en ook omdat de energieverliezen door wrijving zeker te groot worden. We zijn dus aangewezen op zweeflagers. Hiervan eist bij de lagers met uitwendige drukbron de pomp alleen al meer dan 2 watt aan vermogen. Het zelfwerkende lager lijkt goede kansen te bieden (evenals het magnetische lager, maar deze mogelijkheid is voor het genoemde geval nog niet nader onderzocht).

Gebruik makend van de formules (1) en (2) voor het zelfwerkende lager (blz. 301 in deel I), gebracht in een normale vorm voor het axiale lager, krijgen we als de twee voorwaarden waaraan het lager moet voldoen:

$$W = \frac{K_1'\eta\omega r^4}{h_2^2} \geqslant 10 \text{ (newton)}, \quad . \; . \quad (1a)$$

$$P = \frac{K_2'\eta\omega^2 r^4}{h_2} \leqslant 1{,}5 \text{ (watt)}. \quad . \; . \quad (2a)$$

We brengen in herinnering dat W de draagkracht en P het wrijvingsverlies van het lager voorstelt; η is de viscositeit, ω de hoeksnelheid, r de halve buitendiameter en h_2 de kleinste spleethoogte, terwijl de kengetallen van het lager (dit zijn weer andere dan in verg. 1,2 en 4,5) met K_1' en K_2' zijn aangeduid.

Deling van de twee voorwaarden op elkaar geeft:

$$\frac{W}{P} = \frac{K_1'}{K_2'\omega h_2} \geqslant \frac{10}{1{,}5} \text{ (seconde/meter)},$$

waaruit volgt:

$$h_2 \leqslant \frac{1{,}5}{10}\,\frac{1}{\omega}\,\frac{K_1'}{K_2'} \text{ (meter)}.$$

Voor ons doel het geschiktst is het Michell-lager. Invullen van de hiervoor berekende optimale waarden van K_1' en K_2', nl. resp. 0,06 en 0,81, en van $\omega \approx 5000$ rad/sec geeft:

$$h_2 \leqslant 2 \ \mu\text{m}.$$

Het verwezenlijken van een zo kleine spleethoogte is misschien wel mogelijk, gezien de Amerikaanse

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

prestaties voor radiale lagers [5]), maar indertijd werd aan de realiseerbaarheid getwijfeld, en aantrekkelijk leek de oplossing in ieder geval niet.

Welke mogelijkheden resten er dan? Men kan alleen nog zoeken naar een lager met een andere geometrie, waardoor de kengetallen K_1' en K_2' andere waarden krijgen; gewenst is dat hun verhouding groter wordt. Het probleem komt fysisch gezien erop neer dat we de wrijvingscoëfficiënt moeten trachten te verkleinen (zie formule (3) in deel I).

Het idee spiraalgroeven te gebruiken

In het Natuurkundig Laboratorium werd door H. Rinia het idee geopperd [17]) voor bovenstaand doel een van groeven voorziene schijf en een gladde schijf ten opzichte van elkaar te laten roteren. Het effect van de groeven, die scheef staan ten opzichte van de relatieve snelheidvector van de beide schijven, is tweeërlei. Ten eerste: er treedt een vernauwingseffect op, doordat het medium in de snelheidsrichting door vernauwingen wordt gestuwd. Ten tweede: wegens de hoek die de groeven met de plaatselijke snelheidsrichting maken, wordt er — bij draaiing in de juiste richting — medium naar het centrum „gepompt". Hierdoor worden de schijven van elkaar gescheiden. Met een door ons geconstrueerd spiraalgroeflager, dat in *fig. 17* is afgebeeld, verkregen we reeds door de bovenste schijf met de hand te draaien (ca. 1 omwenteling per seconde) een luchtlaagje van ongeveer 11 μm, dat de beide schijven volledig van elkaar scheidde.

Waarin schuilt het voordeel — ten aanzien van de nagestreefde vermindering van de wrijvingscoëfficiënt — van de genoemde combinatie van effecten bij het spiraalgroeflager? Globaal kan men dit als volgt zeggen: terwijl bij het Michell-lager de druk nul is in het middelpunt, doordat de relatieve snelheid daar nul is, geeft het spiraalgroeflager door de pompwerking een drukverloop te zien dat vanaf de rand naar het centrum toe oploopt. Men krijgt dus bij het laatstgenoemde lager van een grotere oppervlakte bijdragen tot de draagkracht, zonder dat het wrijvingsverlies daarmee veel groter wordt. Hieronder zal het verschil nog meer kwantitatief worden weergegeven.

Naar ons achteraf bleek, was er reeds van verschillende zijden aan de ontwikkeling van het spiraalgroeflager gewerkt. Gümbel heeft in 1925 als eerste een beschrijving van het principe gegeven, zonder octrooi erop aan te vragen [18]). Whipple maakte de eerste berekeningen erover (1949), doch deze werden niet direct openbaar gemaakt. Op grond van zijn berekeningen is een spiraalgroeflager gerealiseerd voor de in deel II besproken CO_2-circulator, die voor koeling van kernreactoren dienst doet [19]).

Wij willen er echter wel de aandacht op vestigen dat het doel dat Whipple met zijn berekeningen beoogde, een ander was dan het onze. Hij onderzocht de mogelijkheid een gaslager te maken dat van een eenvoudiger constructie was dan het Michell-lager. Het feit dat het spiraalgroeflager de mogelijkheid biedt tot een verkleinen van de wrijvingscoëfficiënt, is door Whipple niet expliciet aangegeven, en hij heeft dan ook geen moeite besteed aan een verdere theoretische en experimentele uitwerking ervan.

Het optimaal maken van een spiraalgroeflager

Eenmaal de richting voor het onderzoek gevonden hebbend, was het voornaamste werk een optimaal resultaat te verkrijgen. Het eerste experimentele lager was bij lange na nog niet in staat aan de gestelde

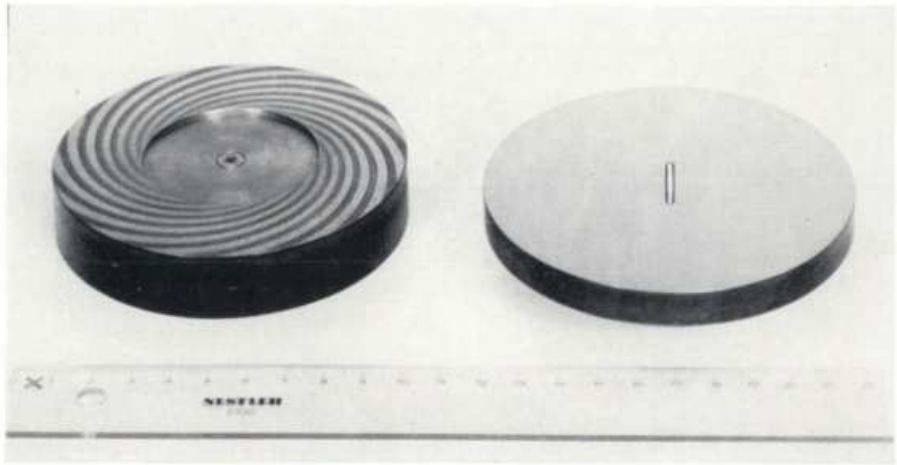


Fig. 17. Rechts de gladde en links de gegroefde schijf van een door ons gemaakt spiraalgroeflager. Draait men de schijven met de hand ten opzichte van elkaar — in de juiste richting —, dan ontstaat reeds bij één omwenteling per seconde een volledige scheiding van de oppervlakken door een luchtlaagje van ca. 11 μm.

[17]) H. Rinia, Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. **70**, 144, 1961.

[18]) L. Gümbel en E. Everling, Reibung und Schmierung im Maschinenbau, Krayn Verl., Berlijn 1925, zie vooral blz. 81. Te oordelen naar het feit dat Gümbel in dit boek het spiraalgroeflager in de vorm van een oefenvoorbeeld behandelt, heeft hij de praktische betekenis ervan niet hoog aangeslagen en de moeilijkheden van een volledige theoretische behandeling wellicht onderschat.

[19]) Zie het in [2]) aangehaalde artikel, en verder: R. T. P. Whipple, The inclined groove bearing, A.E.R.E., T/R 622, revised Oct. 1958; idem, First int. Symp. on gas-lubricated bearings, Washington 1959, blz. 361-382.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

eisen te voldoen. We bespreken thans globaal de berekeningen voor het verkrijgen van optimale draagkracht. Bij de volledige berekeningen is behalve de draagkracht ook het wrijvingsverlies in aanmerking genomen [20]).

We begonnen een model te beschouwen met rechtlijnige groeven en dammen, zie *fig. 18*. Aannemende dat het medium incompressibel is en zich in een stationaire toestand bevindt, geldt voor de drukverdeling in het model de differentiaalvergelijking van Laplace:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0. \quad \ldots\ldots (7)$$

Voor de desbetreffende randvoorwaarden was er geen analytische oplossing te vinden. Als eenvoudigste benaderingsoplossing beschouwen we twee afzonderlijke lineaire functies, die aan de differentiaalvergelijking voldoen, één voor de druk boven de dam (p_d) en één voor die boven de groef (p_g):

$$p_d = p_1 + A_1 x + B_1 y, \quad \ldots\ldots (8)$$

$$p_g = p_2 + A_2 x + B_2 y. \quad \ldots (9)$$

Met deze functies kan niet voldaan worden aan de randvoorwaarden bij $y = 0$ en $y = d$; zoals *fig. 19* laat zien, wordt het drukverloop hierlangs benaderd door een zaagtand. De zes parameters die in de twee functies voorkomen, hebben we berekend uit de zes overige randvoorwaarden (d.i. de continuïteitsvoorwaarde en de voorwaarde dat de druk aan de randen tussen de groef- en damgebieden bij berekening volgens (8) en volgens (9) dezelfde waarde moet hebben). We berekenden op grond van de verkregen parameters het gemiddelde drukverschil Δp tussen $y = 0$ en $y = d$. Ingeval er géén (netto)stroom in de y-richting is, geldt:

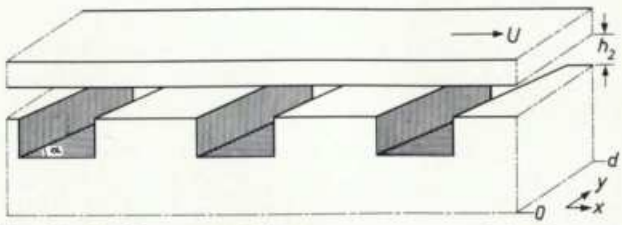


Fig. 18. Model met rechtlijnige groeven voor de berekening van een optimaal spiraalgroeflager.

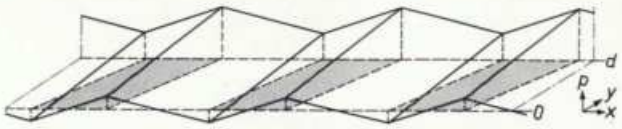


Fig. 19. Eerste benadering van de drukverdeling in het model van fig. 18. Deze benadering voldoet aan de differentiaalvergelijking doch niet aan alle randvoorwaarden. Door optellen van een correctie-oplossing, die elders is afgeleid [20]), krijgt men een drukverdeling met de vereiste constante waarde aan de beide randen ($y = 0$ en $y = d$).

$$\Delta p = g(\alpha,\delta,\gamma)\frac{\eta U d}{h_2^2}. \quad \ldots\ldots (10)$$

η is de viscositeit van het medium, U de relatieve snelheid van de oppervlakken, h_2 de spleethoogte boven de dammen, en $g(\alpha,\delta,\gamma)$ is een functie van de groefhoek α, de verhouding δ van groefdiepte en h_2, en de verhouding γ van groefbreedte en dambreedte. Onze opgave bestaat hierin de grootheden α, δ en γ zo te kiezen dat $g(\alpha,\delta,\gamma)$ zo groot mogelijk wordt. We konden afleiden dat daarvoor in ieder geval $\gamma = 1$ moet zijn. In *fig. 20* is $g(\alpha,\delta,1)$ uitgezet als functie van δ voor verschillende waarden van α. We zien dat $g(\alpha,\delta,1)$ een maximale waarde bereikt voor α en δ resp. 16° en 0,4.

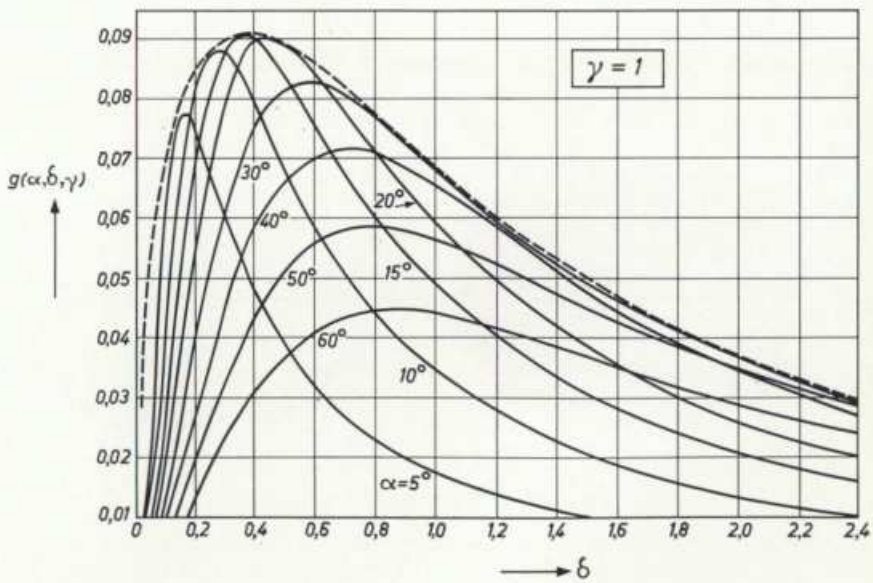


Fig. 20. De functie $g(\alpha,\delta,\gamma)$, met $\gamma = 1$ gesteld, getekend als functie van δ voor een aantal waarden van α. De omhullende van de krommenschaar is gestippeld getekend. Men ziet dat de kromme voor $\alpha \approx 16°$ het hoogste maximum heeft, en dat dit maximum wordt bereikt bij $\delta = 0{,}4$.

[20]) Voor een meer volledige beschrijving van de oplossing van het probleem, zie E. A. Muijderman, De Ingenieur **75**, W 35, 1963 (no. 10), en de binnenkort verschijnende dissertatie van de auteur (Delft). De theoretische uitwerking is verricht in nauwe samenwerking met J. A. Haringx van dit laboratorium.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om deze voor het eenvoudige model gevonden resultaten toe te passen op het spiraalgroeflager, denken we dit onderverdeeld in een groot aantal elementjes die op het model lijken. Ieder elementje moet een optimale bijdrage aan de draagkracht leveren, en dus moet elke groef zo uitgevoerd worden dat de hoek tussen de tangentiële en de radiale richting steeds even groot is, nl. 16° (logaritmische spiraal); de groef en de dam moeten overal even breed zijn ($\gamma = 1$) en de groefdiepte is bepaald door $\delta = 0{,}4$.

Tot zover hebben we ons nog steeds gebaseerd op de verg. (8) en (9), die slechts een benadering van de drukverdeling geven. Voor de wijze waarop we hiervoor gecorrigeerd hebben, en voor de berekening van het wrijvingsmoment in het werkelijke spiraalgroeflager, verwijzen we naar de eerder aangehaalde uitvoeriger publikatie [20]).

In *fig. 21* is achteraan de drukverdeling voor een optimaal spiraalgroeflager, toegepast als eindlager, grafisch voorgesteld. Men ziet dat een tafelbergvormige „drukberg" over het gehele cirkelvormige lageroppervlak wordt verkregen. Vooraan in de figuur is hiertegenover gesteld de drukverdeling voor een Michell-lager, dat zes kantelblokjes bevat. Ter plaatse van elk blokje heeft men een afzonderlijke „drukheuvel", en het is zonder meer duidelijk dat de integratie van de druk over de gezamenlijke heuvels een veel geringere totale draagkracht zal opleveren dan de integratie over de tafelberg van het spiraalgroeflager. Toch is het totale grondvlak van de heuvels, dat (door de geringe laagdikte van het smeermiddel daar ter plaatse) bepalend is voor de wrijving, niet veel geringer dan bij het spiraalgroeflager.

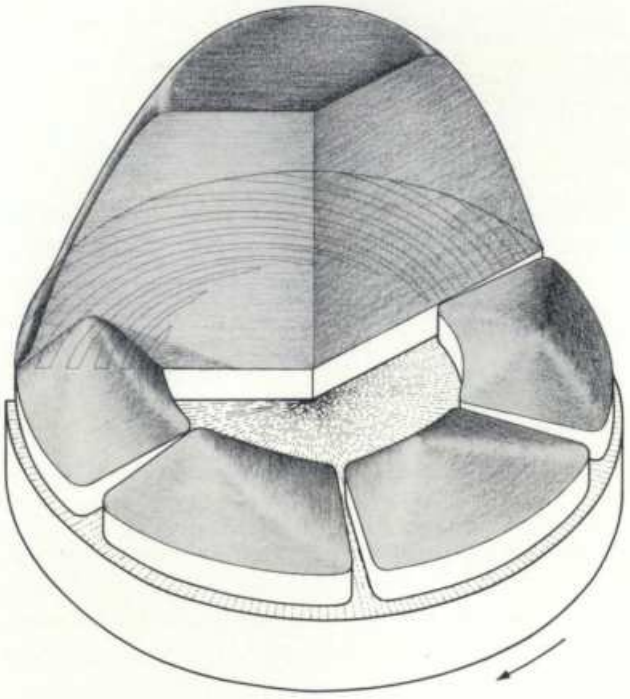


Fig. 21. Driedimensionele voorstelling van de berekende drukverdeling in een optimaal spiraalgroeflager (achteraan) en in een even groot Michell-lager met in totaal zes kantelblokjes (vooraan). Boven de stilstaande plaat met spiraalgroeven resp. de kantelblokjes moet men zich de gladde bovenplaat denken, die in de richting van de pijl roteert. In elk punt van het cirkelvormige lageroppervlak is de aldaar heersende druk verticaal uitgezet, voor beide lagers op dezelfde schaal. Het totale volume van de „drukberg" of „drukheuvels" is een maat voor de verkregen draagkracht.

Verificatie van de theorie

De metingen ter verificatie van de theorie zijn uitgevoerd met de in *fig. 22* schematisch weergegeven meetopstelling. De bovenste, van spiraalgroeven voorziene, schijf *a* werd met een instelbaar toerental gedraaid ten opzichte van de gladde schijf *b*. Voor de centrering van de schijven zorgde het kleine kogellager *c*. Het door de onderste schijf ondervonden wrijvingsmoment werd gemeten door een krachtmeetklokje. De as was zowel radiaal als axiaal ge-

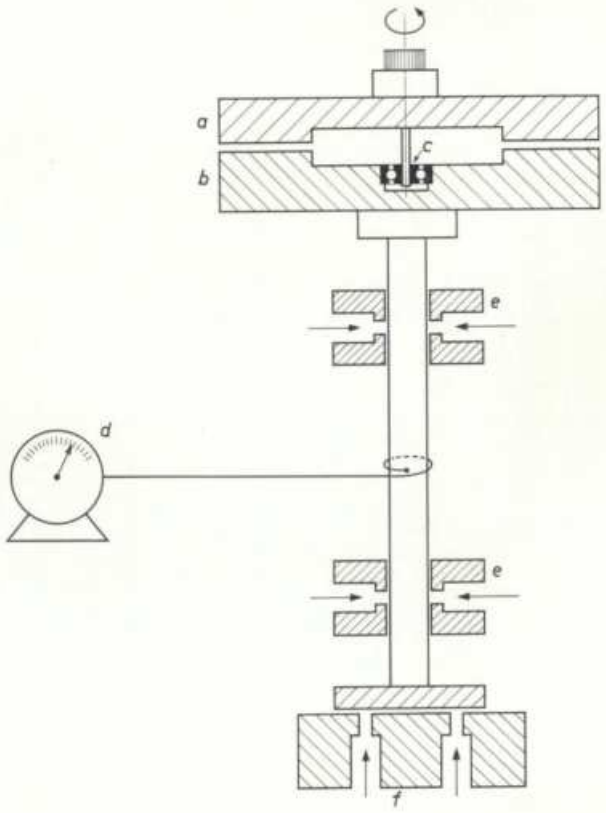


Fig. 22. Schema van een opstelling voor het meten van de wrijving in een spiraalgroeflager. De bovenste, van spiraalgroeven voorziene, schijf *a* wordt met een bepaald toerental gedraaid ten opzichte van de gladde schijf *b*. Het hierdoor op de schijf *b* uitgeoefende wrijvingsmoment wordt gemeten met een krachtmeetklokje *d*. *c* is een zeer klein kogellager ter centrering. *e* zijn radiale luchtlagers en *f* een axiaal luchtlager, alle met uitwendige drukvoorziening.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lagerd met behulp van perslucht, op de wijze die in deel I en II van dit artikel beschreven is. De spleethoogte tussen de schijven van het spiraalgroeflager kon uit capaciteitsmetingen bepaald worden.

Metingen van de spleethoogte voor een gegeven draagkracht en toerental gaven waarden die ongeveer 12% groter waren dan de aanvankelijk berekende. Na de uitwerking van de correctietermen en opvoeren van de meetnauwkeurigheid werd dit verschil 1%, zodat de uiteindelijk verkregen overeenstemming tussen de theorie en het experiment zeer bevredigend mag worden genoemd. Voor het wrijvingsmoment werd gemiddeld 6% verschil tussen theorie en experiment gevonden.

Resultaten

Het aldus door ons optimaal gemaakte spiraalgroeflager heeft een kengetal K_1' dat een factor 8,6 groter is dan dat voor het Michell-lager (als eindlager). Het kengetal K_2' is weliswaar ook groter geworden, doch slechts in geringe mate, nl. 1,2×. Dit betekent dat we de wrijvingscoëfficiënt, vergeleken met die van een Michell-lager met dezelfde straal en spleethoogte, 7,4 maal kleiner hebben weten te maken. Tot op heden is van alle zelfwerkende lagers het spiraalgroeflager datgene waarmee de kleinste waarden van de wrijvingscoëfficiënt bereikt kunnen worden. De voorwaarde voor het oplossen van het op blz. 308 gestelde probleem wordt bij het door ons beschouwde spiraalgroeflager: $h_2 \leqslant 10$ μm. Aan deze voorwaarde is niet moeilijk te voldoen.

De relatief grote draagkracht van het spiraalgroeflager (K_1' is 8,6× groter dan bij het Michell-lager) hebben we nog verder kunnen verhogen door zulk een lager in bolvorm uit te voeren. Vergelijken we een vlak axiaal lager en een bolvormig lager van gelijke straal en van gelijk toerental, dan is gemakkelijk in te zien dat bij dit laatste de oppervlakelementen zich gemiddeld met een grotere snelheid ten opzichte van elkaar bewegen. Bovendien is bij de bolvorm de bij het integreren over de oppervlakelementen in rekening te brengen straal gemiddeld groter. Beide factoren vergroten de draagkracht, zoals direct volgt uit formule (1a). De draagkracht wordt hierdoor zelfs ongeveer 25× zo groot als die van een Michell-lager van gelijke diameter.

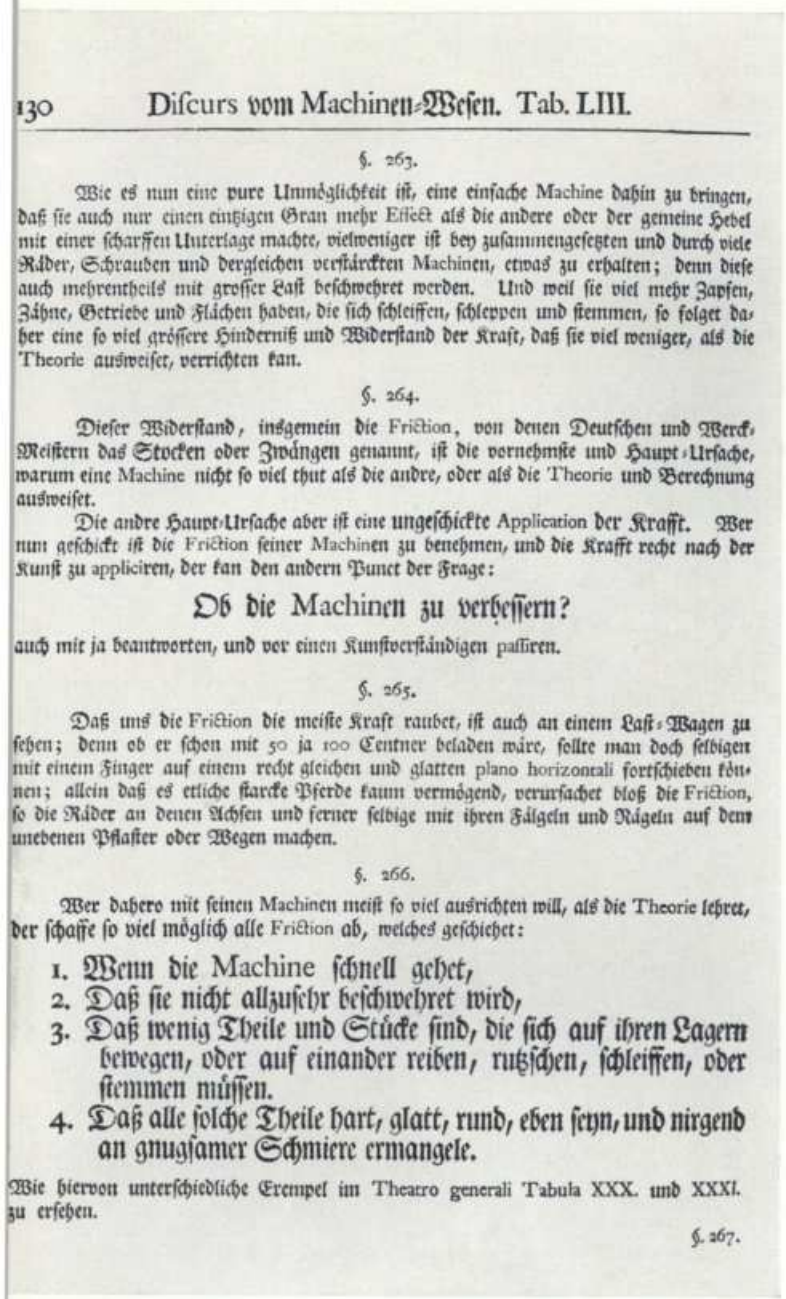
Het bolvormige spiraalgroeflager onderscheidt zich verder nog gunstig van het vlakke, doordat het gemakkelijker is in te stellen en doordat het behalve axiale ook — zij het in geringe mate — radiale belastingen kan opnemen.

Fig. 23 is een afbeelding van twee door ons ge-

THEATRI MACHINARUM
HYDRAULICARUM
Tomus II.
Oder:
Schau-Platz
der Wasser-Künste,
Anderer Theil.
bestehend
In fernerer Fortsetzung der Künste und Machinen, wom
die Wasser aus der Tiefe zu erheben oder in die Höhe zu treiben;
Darbey so wohl falsche und unbrauchbare, die Fehler und Ursachen daraus zu erkennen, als au
viele nützliche und brauchbare zu finden, absonderlich aber eine deutliche Anweisung zu denen M
chinen, da das Wasser vermittelst des Feuers geboben wird, darunter auch die allerneueste
und ohnfehlbar allerleichteste Arth anzutreffen;
Deme beygefüget:
Ein Discurs oder Anweisung zu denen Wasser-Künsten, was eigentli
bey selbigen zu beobachten, und wie das *Theatrum Machinarum* hierbey
zu gebrauchen.
Ein Werck, so nicht nur Künstlern, Kunstmeistern, Bergleuthen un
Kunst-Steigern, ja allen, die selbst Hand anlegen, sondern auch Architectis, Ingenieurs, Commi
rien, Beamten; überhaupt allen Hauswirthen und Kunst-liebenden, absonderlich aber der Jugen
solcher ein Erkäntnis und Fundament gar leichte beyzubringen, sehr nützlich
und nöthig.
Ausgefertiget und mit vielen Figuren versehen
von
Jacob Leupold, Mathematico und Mechanico,
Königl. Preußisch. Commercien-Rath, der Königl. Preuß. und Sächß. wie auch Forlischen
Societäten der Wissenschafften Mitglied.
Zu finden bey dem Autore und Joh. Friedr. Gleditschens seel. Sohn.
Leipzig, druckts Christoph Zunckel, 1725.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



130 Discurs vom Machinen-Wesen. Tab. LIII.

§. 263.

Wie es nun eine pure Unmöglichkeit ist, eine einfache Machine dahin zu bringen, daß sie auch nur einen eintzigen Gran mehr Effect als die andere oder der gemeine Hebel mit einer scharffen Unterlage machte, vielweniger ist bey zusammengesetzten und durch viele Räder, Schrauben und dergleichen verstärckten Machinen, etwas zu erhalten; denn diese auch mehrentheils mit grosser Last beschwehret werden. Und weil sie viel mehr Zapfen, Zähne, Getriebe und Flächen haben, die sich schleiffen, schleppen und stemmen, so folget daher eine so viel grössere Hinderniß und Widerstand der Kraft, daß sie viel weniger, als die Theorie ausweiset, verrichten kan.

§. 264.

Dieser Widerstand, insgemein die Friction, von denen Deutschen und Werck-Meistern das Stocken oder Zwängen genannt, ist die vornehmste und Haupt-Ursache, warum eine Machine nicht so viel thut als die andre, oder als die Theorie und Berechnung ausweiset.

Die andre Haupt-Ursache aber ist eine ungeschickte Application der Krafft. Wer nun geschickt ist die Friction seiner Machinen zu benehmen, und die Krafft recht nach der Kunst zu appliciren, der kan den andern Punct der Frage:

Ob die Machinen zu verbessern?

auch mit ja beantworten, und vor einen Kunstverständigen passiren.

§. 265.

Daß uns die Friction die meiste Kraft raubet, ist auch an einem Last-Wagen zu sehen; denn ob er schon mit 50 ja 100 Centner beladen wäre, sollte man doch selbigen mit einem Finger auf einem recht gleichen und glatten plano horizontali fortschieben können; allein daß es etliche starcke Pferde kaum vermögend, verursachet bloß die Friction, so die Räder an denen Achsen und ferner selbige mit ihren Fälgeln und Nägeln auf dem unebenen Pflaster oder Wegen machen.

§. 266.

Wer dahero mit seinen Machinen meist so viel ausrichten will, als die Theorie lehret, der schaffe so viel möglich alle Friction ab, welches geschiehet:

1. Wenn die Machine schnell gehet,
2. Daß sie nicht allzusehr beschwehret wird,
3. Daß wenig Theile und Stücke sind, die sich auf ihren Lagern bewegen, oder auf einander reiben, rutzschen, schleiffen, oder stemmen müssen.
4. Daß alle solche Theile hart, glatt, rund, eben seyn, und nirgend an gnugsamer Schmiere ermangele.

Wie hiervon unterschiedliche Exempel im Theatro generali Tabula XXX. und XXXI. zu ersehen.

§. 267.

In het artikel van E. A. Muijderman in dit nummer worden enkele voorbeelden uit de Oudheid van maatregelen tegen de wrijving vermeld: smering met olie bij het trekken van een zwaar belaste slede, lagering op kogels van een draaiend platform. Het is duidelijk dat men zich in de ontwikkelingsgang van de Westerse techniek, bij het ontwerpen (en werkelijk uitvoeren!) van steeds ingewikkelder en omvangrijker mechanieken, in een bepaald stadium bewust is moeten worden van de essentiële rol die de wrijvingsverliezen daarbij gaan spelen. Deze bewustwording tekent zich duidelijk af in het werk van Jacob Leupold, Mathematicus en Mechanicus in Pruisen, die in 1725 te Leipzig zijn „Theatrum Machinarum Hydraulicarum" liet verschijnen. Dit boek is grotendeels gewijd aan een der industriële basisproblemen van die tijd, nl. de constructie van machines voor het oppompen van water, hetzij voor het drooghouden van mijnen, hetzij voor de voorziening van steden, landerijen, fonteinen. Leupold brengt hier telkens weer met nadruk naar voren, hoe belangrijk het is, in de machines de „Friction" van delen en stukken tegen elkaar zoveel mogelijk te verminderen. We reproduceren hier uit het tweede deel van zijn werk het titelblad, dat in zijn schilderachtige bewoordingen typisch is voor die tijd, en een bladzijde waarop Leupold zijn leerstellingen sprekend formuleert. Zijn aanbeveling om de machine „snel te laten gaan" (§ 266, punt 1) moet men niet beschouwen als een aanwijzing dat hij reeds voorvoeld heeft dat een zelfwerkend zweeflager een zekere minimumsnelheid nodig heeft om los te komen: hij heeft veeleer op het oog dat bij langzame — en niet al te gelijkmatige — beweging telkens korte momenten van stilstand optreden („Stocken oder Zwängen"), waarin zich de stilstaande in plaats van de bewegende wrijving doet gevoelen.

maakte en beproefde bolvormige spiraalgroeflagers, die met olie werken. De diameter van de kleinste bol is ongeveer 3 mm; bij 5000 omwentelingen per minuut en 1 kg axiale belasting zijn bol en lagerkom reeds volledig door een olielaagje gescheiden. De druk in het centrum bedraagt dan ongeveer 25 atm.

Toepassingsmogelijkheden

De toepassingsmogelijkheden van het spiraalgroeflager beperken zich niet tot die gevallen waarbij het gaat om een kleine wrijvingscoëfficiënt. Zeker zo belangrijk is de eenvoud van het procédé om het spiraalgroeflager te maken, een voordeel dat vooral voor lagers van kleine afmetingen zwaar weegt. Een diameter van 3 mm, zoals bij het kleinste in fig. 23 afgebeelde lager, behoort tot de onmogelijkheden bij lagers van het Michell-type.

Spiraalgroeflagers kunnen ook geschikt worden gemaakt voor axiale lagering van een doorgaande as. Bij zulk een as zal als gevolg van „lek" de pompwerking geen hoge druk kunnen handhaven nabij de as, zodat de drukberg (in dit geval een soort ringwal) lager zal uitvallen dan bij een eindlager. Remedies

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hiertegen zijn gevonden in het partiële spiraalgroeflager en het visgraatlager (*fig. 24*). Bij het eerste is ernaar gestreefd de lek te beperken door de spiraalgroeven veel minder ver te laten doorlopen dan bij het gewone spiraalgroeflager. Zo wordt het pompende deel van het lager door een gebied van grote stromingsweerstand gescheiden van de as, waarlangs het lekken plaatsvindt. In het visgraatlager wordt het lek zelfs geheel tot nul teruggebracht door de (tegengestelde) pompwerking van de andere zijde van de visgraat. Uiteraard wordt bij deze lagervormen, door het zoveel kleinere gebied waarin de drukberg wordt opgebouwd, niet het onderste uit de kan gehaald voor de vermindering van de wrijvingscoëfficiënt. Toch is de wrijvingscoëfficiënt van een visgraatlager nog iets kleiner dan die van een Michell-lager onder vergelijkbare condities. *Fig. 25* laat een visgraatlager zien dat in het Natuurkundig Laboratorium in gebruik is bij een experimentele heetgasmotor [21]).

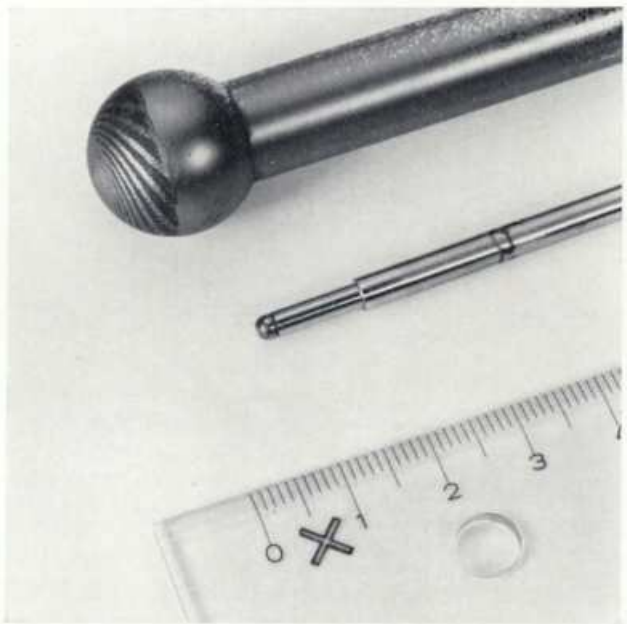


Fig. 23. Asuiteinden voor bolvormige spiraalgroeflagers met een diameter van resp. 18 en 3 mm. De groeven worden op het geharde en gepolijste bolletje (stalen kogels als gebruikelijk in kogellagers) aangebracht door middel van een etsprocédé. Het metaaloppervlak wordt bedekt met een lichtgevoelige laklaag en daarna belicht door een negatief dat het gewenste spiraalgroevenpatroon bevat. Brengt men het bolletje vervolgens in een etsbad (b.v. van $FeCl_3$), dan wordt de laklaag en derhalve ook het eronder liggende metaal alleen op de belichte plaatsen door het etsmiddel aangetast.

De groeven kunnen ook in de lagerkom in plaats van op het bolletje worden aangebracht. De kom kan b.v. van aluminium worden gemaakt, ook hiervoor kan $FeCl_3$ als etsmiddel worden gebruikt.

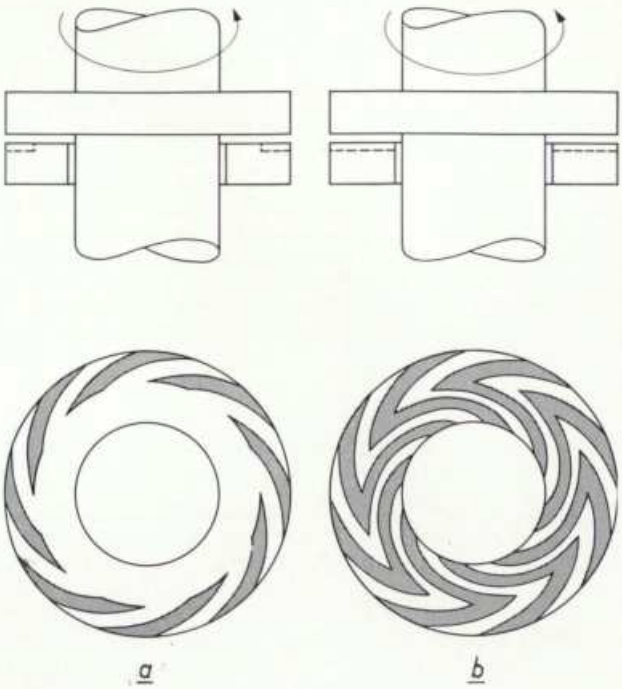


Fig. 24. Twee typen spiraalgroeflagers, geschikt voor axiale lagering van een doorgaande as. *a*) Partieel spiraalgroeflager, waarbij de spiraalgroeven veel minder ver doorlopen dan bij het gewone spiraalgroeflager. *b*) Visgraatlager.

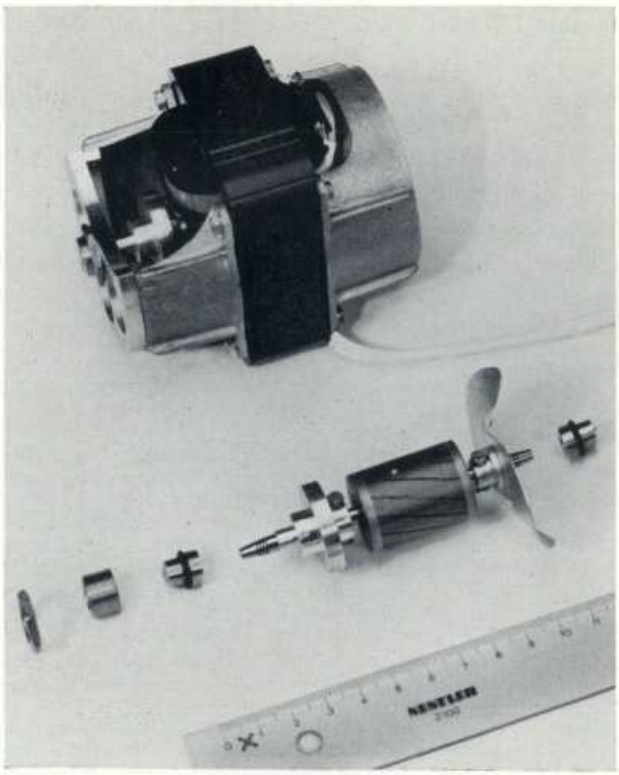
Nog een andere interessante uitvoeringsvorm van het spiraalgroeflager is het conische lager. Het bijzondere hiervan is dat het behalve axiale ook radiale belastingen kan opnemen. Deze eigenschap heeft men weliswaar, zoals vermeld, ook bij het bol-

Fig. 25. Een visgraatlager dat toegepast wordt bij een in het Natuurkundig Laboratorium ontwikkelde heetgasmotor [21]).

[21]) De praktische realisering is het werk geweest van R. J. Meijer en medewerkers van dit laboratorium.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



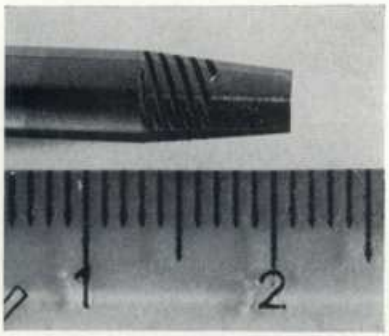


Fig. 26. Proefmotortje met conisch spiraalgroeflager, dat behalve axiale ook ongeveer even grote radiale belastingen kan opnemen. Vooraan een „exploded view" van een rotor van een tweede exemplaar. Een asuiteinde met de groeven is hierboven afzonderlijk weergegeven.

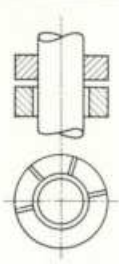
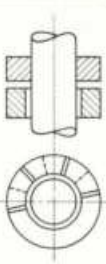
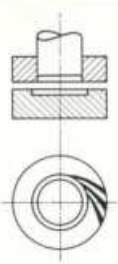
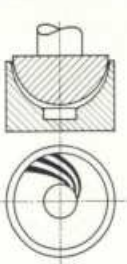
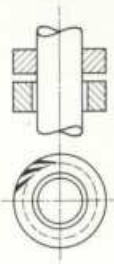
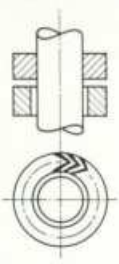
vormige spiraalgroeflager, maar slechts in veel geringere mate. (Voor een zuiver radiale lagering levert het aanbrengen van spiraalgroeven geen winst in de wrijvingscoëfficiënt, zoals een nadere beschouwing leert.) In *fig. 26* is een zeer onlangs in ons laboratorium geconstrueerd conisch spiraalgroeflager voor een motortje afgebeeld.

De voor alle besproken lagervormen berekende optimale kengetallen zijn vermeld in *tabel I*.

Smering met vet

Ten slotte een enkel woord over een onverwachte ontdekking die ons de afgelopen jaren sterk heeft bezig gehouden: bijzondere perspectieven openen

Tabel I. Een aantal vormen van axiale lagers, met hun berekende kengetallen K_1' en K_2' voor optimale instelling. De buitendiameter is voor alle lagers even groot ondersteld, bij de vlakke lagers is deze het dubbele van de binnendiameter. Bij het bolvormige lager is het halve verschil van komdiameter en boldiameter als spleethoogte aangenomen.

	Michell-lager	stoep-lager	spiraalgroeflagers			
			vlak eind-lager	bol-vormig	met doorgaande as	
					partieel	visgraat
						
K_1'	0,042	0,047	0,366	1,11	0,124	0,106
K_2'	22,0	ca. 25	2,9	2,8	8,1	10,2

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zich voor de kleine spiraalgroeflagers van enkele mm diameter door ze te smeren met *vet*.

Als we werken met lagers van zulke kleine afmetingen, gaat de smering ervan een probleem op zichzelf worden. Het handhaven van een continue smering wordt naar verhouding te gecompliceerd en te kostbaar. We denken hierbij vooral aan apparaten die elke stand in de ruimte moeten kunnen innemen en die gedurende onregelmatige periodes in werking zijn (kleine huishoudelijke apparaten).

Wat nu als we vet nemen? Vet wordt enerzijds evenals olie door de pompwerking van het spiraalgroeflager in de spleet „gezogen", maar anderzijds is het duidelijk dat het bij stilstand van de as veel minder gemakkelijk dan olie uit de omgeving van de lagerspleet verdwijnt.

Het is ons reeds gebleken dat na lange periodes van stilstand, b.v. enkele maanden tot 1 jaar, en bij verschillende standen in de ruimte de smering bij opnieuw starten niets te wensen overliet; reeds bij dezelfde relatief lage toerentallen als bij de eerste beproevingen was er volledige scheiding van de oppervlakken. Nader onderzoek hieromtrent is gaande.

Een vraagstuk dat ons in dit verband bezighoudt, is of het vet bij langdurig functioneren van het lager zijn goede smeringskwaliteiten behoudt, b.v. of het niet chemisch van samenstelling verandert; voorts of het niet 's zomers bij langdurige periodes van grote hitte toch zou weglekken. Incidentele beproevingen op dit punt, zich uitstrekkend over periodes van enkele maanden tot een periode van twee jaar, hebben tot dusver geen enkele moeilijkheid aan het licht gebracht.

Langere beproeving in de praktijk zal nog noodzakelijk zijn, maar persoonlijk koesteren wij van deze minuscule „zweeflagers op vet" goede verwachtingen voor de toekomst.

Samenvatting. In dit artikel worden lagers besproken waarbij de wrijving en slijtage zeer gering gemaakt zijn door de ten opzichte van elkaar bewegende lichamen met behulp van een viskeus medium (smeermiddel) op een kleine en tamelijk constante afstand van elkaar te houden. Het smeermiddel voor zulk een zg. zweeflager kan niet alleen een vloeistof zoals olie, maar ook een gas zijn. Speciaal aan deze, sinds ongeveer 15 jaren in de praktijk gerealiseerde, mogelijkheid wordt aandacht gegeven. Er worden twee categorieën zweeflagers onderscheiden: lagers met uitwendige drukbron en zelfwerkende lagers. Bij hun onderlinge vergelijking wordt globaal aangegeven voor welke toepassingsgebieden elk zich het beste leent. Rekening moet echter gehouden worden met het, moeilijk voorspelbare, optreden van instabiliteitsverschijnselen. Toepassingsvoorbeelden van gaslagers vindt men in straalturbines, gyrokompassen, kernreactoren, tandartsboren, enz.

Uitgaande van het zelfwerkende zweeflager is — grotendeels in het Philipslaboratorium te Eindhoven — een nieuw type lager ontwikkeld: het spiraalgroeflager. Het voornaamste voordeel van dit soort lager is de zeer geringe wrijvingscoëfficiënt. Deze is voor een uitvoering als vlak eindlager ca. $^1/_7$ van die van een Michell-lager onder vergelijkbare optimale omstandigheden. In een bolvormige uitvoering heeft het spiraalgroeflager bovendien een ca. 25× zo grote draagkracht als het overeenkomstige Michell-lager. Veelbelovend, o.m. voor gebruik in kleine huishoudelijke apparaten, zijn spiraalgroeflagers met een diameter van enkele millimeters waarbij als smeermiddel vet wordt toegepast.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!